

THESIS / THÈSE

MASTER EN SCIENCES INFORMATIQUES

Proposition d'une méthodologie pour les émissions de CO2 d'un service informatique hébergé dans un data center

Huet, Maxime

Award date:
2015

Awarding institution:
Université de Namur

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

UNIVERSITÉ DE NAMUR
Faculté d'informatique
Année académique 2014–2015

**Proposition d'une méthodologie pour
les émissions de CO₂ d'un service
informatique hébergé dans un data
center**

HUET Maxime



Maître de stage : SWINNEN Tanguy

Promoteur : _____ (Signature pour approbation du dépôt - REE art. 40)
PETIT Michaël

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de
Master en Sciences Informatiques.

Résumé

Ce mémoire est né de l'idée de Monsieur Swinnen lors de la réunion de début de stage en Septembre 2014. Lors de cette réunion, Monsieur Swinnen est venu avec une idée qu'un client, le data center du Luxembourg, lui avait donnée. En effet, celui-ci se demandait s'il était possible de comptabiliser les émissions de CO₂ d'un certain service informatique hébergé par une entreprise externe dans les enceintes d'un data center. En effet, d'ici quelques années, l'évaluation carbone des entreprises deviendra obligatoire pour toutes les entreprises. Pour le moment, des lois existent dans quelques pays, mais rien n'est encore réglementé au niveau européen même si on entrevoit une ouverture avec le récent accord de l'Union Européenne sur le fait de réduire ses émissions de CO₂ de 30% d'ici 2020.

Ce mémoire s'intéresse à cette problématique en fournissant une proposition de méthodologie afin de comptabiliser les émissions de CO₂ d'un service informatique hébergé dans un data center. Elle présente les différentes étapes du processus se basant sur plusieurs autres méthodes de mesure de CO₂ et en apportant une touche d'originalité qui est l'ajout d'une méthode empruntée à la comptabilité analytique, «l'Activity Based Costing». Cette méthode permet d'avoir une analyse plus fine des activités génératrices de CO₂ à l'intérieur du data center. La méthodologie prend en compte toutes les émissions de CO₂ émises par le data center : celles dues à la construction du bâtiment, aux phases de fabrication et de fin de vie des équipements IT et non IT et aux phases d'utilisations de ces équipements.

La méthodologie cible deux types de publics : d'une part les data centers ayant une connaissance approximative des données concernant leur équipement IT et non IT et d'autre part les data centers ayant une connaissance précise de ces données. Pour la première catégorie, elle fournit un processus divisé en plusieurs étapes avec des données génériques (approximatives) des émissions de CO₂ afin de générer des chiffres approximatifs des émissions relatives au service du client. Tandis que pour la deuxième catégorie, elle fournira le processus et c'est l'entreprise qui devra remplir les chiffres grâce à ses données précises. En effet, les données génériques ne sont là que pour aider à avoir des chiffres en résultat si des données précises ne sont pas présentes.

Mots clés — Data center, CO₂, Virtualisation, Activity Based Costing, GHG Protocol, ADEME, Carbon Trust, ITU-T, Evaluation CO₂, Bilan Carbone, Green-IT, ArchiMate

Avant-propos

Ce mémoire est le résultat final de mon parcours universitaire à l'Université de Namur. C'est le résultat d'une bonne collaboration avec mon promoteur, M. Michaël PETIT. Je tiens à le remercier pour son implication et pour ses précieux conseils afin d'améliorer la qualité de ce travail.

Merci également à mon maitre de stage M. Tanguy SWINNEN sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour. Je le remercie pour avoir accepté de collaborer avec moi dans le cadre du stage, pour son implication dans le suivi du travail et pour tous les conseils qu'il m'a fournis.

Un grand merci à toutes les personnes qui m'ont soutenu pendant ce long parcours. Et en particulier à mon père pour le temps consacré à la relecture de ce mémoire.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Introduction | 11 |
| I Etat de l'art | 13 |
| 1 Les data centers | 14 |
| 1.1 Data center et data center «green» | 14 |
| 1.2 Composition d'un data center | 14 |
| 1.3 Caractéristiques des data centers d'aujourd'hui | 15 |
| 1.4 Classification des data centers | 15 |
| 1.5 Les différents types d'offres de data center | 16 |
| 1.6 Empreinte environnementale des data centers | 18 |
| 1.7 Nécessité des data centers green | 18 |
| 1.8 Mesures à prendre pour envisager un data center green | 20 |
| 1.9 Les différentes mesures d'efficacité énergétique d'un data center | 20 |
| 1.10 La virtualisation : au centre des data center 3.0 | 21 |
| 2 La virtualisation des ressources | 22 |
| 2.1 Définition de la virtualisation | 22 |
| 2.2 Les différentes techniques de virtualisation | 24 |
| 2.2.1 Virtualisation complète | 24 |
| 2.2.2 Para-virtualisation | 25 |
| 2.2.3 Hyperviseurs | 26 |
| 2.2.4 Cloisonnement | 27 |
| 2.3 Les différents hardwares à virtualiser | 27 |
| 2.3.1 La virtualisation de postes de travail | 27 |
| 2.3.2 La virtualisation des serveurs | 28 |
| 2.3.3 La virtualisation de stockage | 28 |
| 2.3.4 La virtualisation du réseau | 29 |
| 2.3.5 La virtualisation d'application | 29 |
| 2.4 Les avantages de la virtualisation | 30 |
| 2.5 Facturation des ressources d'une application à l'utilisateur | 32 |
| 3 Une architecture d'Entreprise en support à une démarche GreenIT | 33 |
| 3.1 Un modèle d'architecture d'entreprise | 33 |
| 3.2 ArchiMate | 34 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.2.1 | Qu'est ce qu'est ArchiMate | 34 |
| 3.2.2 | ArchiMate : un langage de modélisation | 35 |
| 3.2.2.1 | Les éléments d'ArchiMate | 35 |
| 3.2.2.2 | Les concepts d'ArchiMate | 36 |
| 3.2.2.3 | Que retenir dans le cas de notre problématique | 40 |
| 3.2.3 | La virtualisation avec ArchiMate | 41 |
| 4 | Méthodes de mesure de CO₂ | 44 |
| 4.1 | Éléments des bilans carbone | 45 |
| 4.1.1 | Les différentes normes en matière de bilan carbone | 45 |
| 4.1.2 | Périmètre organisationnel | 45 |
| 4.1.3 | Périmètre opérationnel | 46 |
| 4.1.4 | Les postes d'émissions liés aux différents scopes | 47 |
| 4.2 | Fonctionnement des services dématérialisés | 48 |
| 4.2.1 | Terminaux des clients | 49 |
| 4.2.2 | Périphériques | 50 |
| 4.2.3 | Logiciels clients ou logiciels embarqués | 50 |
| 4.2.4 | Serveurs informatiques et équipements télécoms | 51 |
| 4.2.5 | Logiciels applicatifs | 52 |
| 4.2.6 | Réseaux de communications | 53 |
| 4.2.7 | Infrastructures d'hébergement physiques des équipements | 54 |
| 4.3 | Carbon Trust | 55 |
| 4.3.1 | L'empreinte carbone | 55 |
| 4.3.2 | Étapes de la méthode Carbon Trust | 56 |
| 4.4 | ADEME et CIGREF | 56 |
| 4.4.1 | Étapes de la méthode ADEME et CIGREF | 57 |
| 4.4.1.1 | Pré-requis | 57 |
| 4.4.1.2 | Cadrage | 58 |
| 4.4.1.3 | Collecte de données | 59 |
| 4.4.1.4 | Analyse et restitution des données | 59 |
| 4.4.1.5 | Plan d'action | 59 |
| 4.4.2 | Facteurs d'émissions et données génériques | 60 |
| 4.5 | ITU-T : Telecommunication standardization secto of ITU | 60 |
| 4.5.1 | Étapes de la méthodologie ITU-T | 60 |
| 4.5.1.1 | Frontières organisationnelles | 60 |
| 4.5.1.2 | Frontières opérationnelles | 60 |
| 4.5.1.3 | Sélectionner une méthode de quantification | 60 |
| 4.5.1.4 | Collection de données | 60 |
| 4.5.1.5 | Mesures pour réduire les émissions de GES | 60 |
| 4.5.1.6 | Évaluation annuelle | 61 |
| 4.6 | GHG Protocol : data center | 61 |
| 4.6.1 | Étapes de la méthode GHG protocol pour les data centers | 61 |
| 4.6.1.1 | Définition des frontières opérationnelles d'un data center | 61 |
| 4.6.1.2 | Sources d'émissions | 61 |
| 4.6.1.3 | Calcul de l'impact du cycle de vie d'un data center | 62 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.7 | Analyse critique | 63 |
| 5 | Activity Based Costing | 65 |
| 5.1 | Définition et objectifs de la méthode ABC | 65 |
| 5.2 | Principes de la méthode ABC | 66 |
| 5.2.1 | Notions d'activité, de processus et d'inducteurs | 67 |
| 5.3 | Démarche à adopter pour la méthode ABC | 68 |
| 5.4 | Exemple d'une méthode ABC | 69 |
| 5.5 | Analyse des points forts et faibles de la méthode | 70 |
| II | Proposition d'une méthodologie pour les émissions de CO₂ d'un service informatique hébergé dans un data center | 72 |
| 6 | Une méthodologie intégrée pour l'évaluation de l'impact CO₂ de l'infrastructure IT virtualisée | 73 |
| 6.1 | Préliminaire : définition d'une méthodologie | 73 |
| 6.2 | Introduction | 73 |
| 6.3 | Processus (méthode) | 74 |
| 6.3.1 | Définition du périmètre organisationnel et opérationnel | 75 |
| 6.3.2 | Collecte des différentes données | 76 |
| 6.3.2.1 | Energie grise du bâtiment | 77 |
| 6.3.2.2 | Phase de fabrication et de fin de vie des équipements IT | 77 |
| 6.3.2.3 | Phase de fabrication et de fin de vie des équipements non IT | 78 |
| 6.3.2.4 | Phase d'utilisation des équipements IT | 79 |
| 6.3.2.5 | Phase d'utilisation des équipements non IT | 79 |
| 6.3.2.6 | Préparer la méthode ABC | 79 |
| 6.3.3 | Modélisation de la structure des serveurs | 81 |
| 6.3.4 | Application de la méthode ABC | 83 |
| 6.3.5 | Application des métriques | 83 |
| 6.3.6 | Analyse des données recueillies | 84 |
| 7 | Prototype d'outil logiciel de support à l'évaluation de CO₂ d'un service hébergé dans un data center | 85 |
| 7.1 | Explication | 85 |
| 7.1.1 | Energie grise du bâtiment | 85 |
| 7.1.2 | Phase de fabrication et de fin de vie des équipements IT | 86 |
| 7.1.3 | Phase de fabrication et de fin de vie des équipements non IT | 87 |
| 7.1.4 | Phase d'utilisation des équipements IT | 87 |
| 7.1.5 | Phase d'utilisation des équipements non IT | 88 |
| 7.1.6 | Tableau final reprenant l'ensemble des informations et la méthode ABC | 88 |
| 8 | Etude de cas fictive | 92 |
| 8.1 | 1 ^{ère} étape : définition du périmètre organisationnel et opérationnel | 92 |
| 8.2 | 2 ^{ème} étape : collecte des données | 93 |
| 8.3 | 3 ^{ème} étape : modélisation de la structure du serveur | 94 |

| | | |
|---|---|------------|
| 8.4 | 4 ^{ème} étape : Mise en place des données dans les différents tableaux | 96 |
| 8.4.1 | Energie grise du bâtiment | 96 |
| 8.4.2 | Phase de fabrication et de fin de vie des équipements IT | 96 |
| 8.4.3 | Phase de fabrication et de fin de vie des équipements non IT | 97 |
| 8.4.4 | Phase d'utilisation des équipements IT | 97 |
| 8.4.5 | Phase d'utilisation des équipements non IT | 97 |
| 8.4.6 | Méthode ABC | 97 |
| Conclusion | | 99 |
| III Annexe | | 100 |
| Appendices | | 101 |
| A Facteurs d'émissions et données génériques | | 102 |
| A.1 | Facteurs d'émissions et données génériques | 102 |
| A.1.1 | Données des équipements IT | 104 |
| A.1.2 | Données des équipements non IT | 105 |
| A.1.3 | Ordinateurs, écrans | 106 |
| Bibliographie | | 107 |

Table des figures

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Architecture typique sans virtualisation [Culture Informatique, 2013] | 23 |
| 2.2 | Architecture typique avec virtualisation [Culture Informatique, 2013] | 24 |
| 2.3 | Virtualisation complète | 25 |
| 2.4 | Para-virtualisation | 26 |
| 2.5 | Hyperviseur | 27 |
| 2.6 | Virtualisation de stockage | 29 |
| 2.7 | Rendement d'un serveur sans virtualisation (à gauche) et avec virtualisation (à droite) [Santy, 2010] | 30 |
| 3.1 | But d'ArchiMate : Assurer une cohérence entre les différents éléments de l'architecture | 34 |
| 3.2 | Organisation du framework ArchiMate en cellule | 36 |
| 3.3 | Architecture typique sans virtualisation | 42 |
| 3.4 | Architecture typique avec virtualisation | 43 |
| 4.1 | Éléments présents dans les scope 1, 2 et 3 | 47 |
| 4.2 | Analyse d'impact des activités TNIC | 49 |
| 4.3 | Les différentes sortes d'empreintes carbone | 56 |
| 4.4 | Organisation d'un bilan de GES selon ADEME [Ademe et Cigref , 2012] | 57 |
| 4.5 | Étapes du cycle de vie d'un data center [GHG Protocol, 2012b] | 62 |
| 5.1 | La chaîne de valeur de Porter | 66 |
| 5.2 | Principe de la méthode ABC [Jacquot, 2007] | 66 |
| 6.1 | But de la méthodologie proposée | 74 |
| 6.2 | Schéma des différentes étapes du processus | 75 |
| 6.3 | Schéma du processus lié au data center | 80 |
| 6.4 | Transfert d'une machine physique vers une autre si le serveur est en maintenance ou en panne | 81 |
| 6.5 | Architecture typique avec virtualisation | 82 |
| 7.1 | Tableau pour le calcul de l'énergie grise d'un data center | 86 |
| 7.2 | Tableau pour le calcul des émissions de CO ₂ durant la phase de fabrication et de fin vie des équipements IT | 86 |
| 7.3 | Tableau pour le calcul des émissions de CO ₂ durant la phase de fabrication et de fin de vie des équipements non IT | 87 |
| 7.4 | Tableau pour le calcul des émissions de CO ₂ durant la phase d'utilisation des équipements IT | 88 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 7.5 | Tableau pour le calcul des émissions de CO ₂ durant la phase d'utilisation des équipements non IT | 88 |
| 7.6 | Tableau de calcul pour la méthode ABC | 91 |
| 8.1 | Modélisation de la structure du serveur | 95 |
| 8.2 | Emissions de CO ₂ de l'énergie grise du data center | 96 |
| 8.3 | Emissions de CO ₂ durant la phase de fabrication et de fin de vie des équipements IT | 96 |
| 8.4 | Emissions de CO ₂ durant la phase de fabrication et de fin de vie des équipements non IT | 97 |
| 8.5 | Emissions de CO ₂ durant la phase d'utilisation des équipements IT | 97 |
| 8.6 | Emissions de CO ₂ durant la phase d'utilisation des équipements non IT | 97 |
| 8.7 | Tableau de la méthode ABC pour le data center | 98 |
| A.1 | Les différents facteurs d'émissions dans un data center | 103 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Récapitulatif des différents Tiers [Wikipédia, 2013b] | 16 |
| 3.1 | Concepts de la couche business | 38 |
| 3.2 | Concepts de la couche applicative | 39 |
| 3.3 | Concepts de la couche infrastructure | 40 |
| 4.1 | Les différents postes d'émissions relatifs aux scopes | 48 |
| 4.2 | Postes d'émissions des terminaux des clients | 50 |
| 4.3 | Postes d'émissions des périphériques | 50 |
| 4.4 | Postes d'émissions des logiciels clients ou logiciels embarqués | 51 |
| 4.5 | Postes d'émissions des serveurs informatiques et équipements télécoms | 52 |
| 4.6 | Postes d'émissions des logiciels applicatifs | 53 |
| 4.7 | Postes d'émissions des réseaux de communication | 54 |
| 4.8 | Postes d'émissions des infrastructures d'hébergement physiques des équipements | 55 |
| 4.9 | Nature des données à récolter | 59 |
| 5.1 | Activités de l'intervention sur site clients | 69 |
| 5.2 | Activités de l'intervention sur site clients | 70 |
| 5.3 | Activités de l'intervention sur site clients | 70 |
| 5.4 | Points forts et points faibles de la méthode ABC | 71 |
| 6.1 | Périmètre opérationnel du data center | 76 |
| 6.2 | Données à récolter des équipements IT pour la phase de fabrication et de fin de vie | 77 |
| 6.3 | Données à récolter des équipements non IT pour la phase de fabrication et de fin de vie | 78 |
| 6.4 | Données à récolter des équipements IT pour la phase d'utilisation | 79 |
| 6.5 | Données à récolter des équipements non IT pour d'utilisation | 79 |
| 6.6 | Activités du processus d'offre de cloud computing | 83 |
| 6.7 | Coefficients d'émissions de CO ₂ provenant du CWaPE [Huart, 2012] | 84 |
| 8.1 | Données récoltées des équipements IT pour la phase de fabrication et de fin de vie | 93 |
| 8.2 | Données récoltées des équipements non IT pour la phase de fabrication et de fin de vie | 93 |
| 8.3 | Données récoltées des équipements IT lors de la phase d'utilisation | 94 |
| 8.4 | Données récoltées des équipements non IT lors de la phase d'utilisation | 94 |

Introduction

De nos jours, nous ne pouvons plus ignorer l'impact énergétique des différents data centers présents dans le monde. Ceux-ci se multiplient en réponse à l'augmentation de la demande de stockage et d'hébergement que le monde actuel demande. L'explosion du nombre et de la taille des data centers à travers le monde a, parallèlement, créé un besoin important en énergie pour les faire fonctionner. "Les data centers étaient en 2010 émetteurs de 2 % des émissions de carbone dans le monde" [ABB, 2011] et à titre de comparaisons, un data center peut produire l'électricité pour 40 000 foyers en moyenne.

L'impact carbone relatif au fonctionnement de ces data centers et des entreprises en général ne doit plus être ignoré et doit être géré afin d'avoir une vue globale sur ce qui produit réellement des émissions de CO₂. Cet impact carbone, de plus en plus d'entreprises le calcule. En effet, les préoccupations du monde sur le réchauffement climatique font en sorte que les entreprises se sentent de plus en plus concernées par ce problème et essayent de réduire leurs émissions de CO₂. L'impact carbone est calculé grâce au bilan carbone. Il permet de quantifier les émissions de gaz à effet de serre d'une entreprise qui pourra ainsi estimer les émissions directes (chaudières, véhicules propres, ...) et indirectes (électricité achetée, transport lié à l'acheminement des matières premières, fin de vie des déchets engendrés, ...) de son activité et, par conséquent, trouver des pistes d'action pour lutter contre le réchauffement climatique mais aussi pour réduire ses coûts.

Dans les prochaines années, les mesures visant à réduire l'impact du changement climatique vont se multiplier et vont peut-être avoir un impact sur ce bilan carbone. Le 23 octobre 2014, les dirigeants européens se sont réunis à Bruxelles pour le sommet du climat et ils se sont engagés à réduire d'au moins 40% les émissions de gaz à effet de serre de l'UE d'ici 2030, un objectif «ambitieux» pour mettre l'Europe en position de leader mondial [Commission Européenne, 2014]. L'année dernière, le Royaume-Uni oblige les entreprises cotées en Bourse à publier des informations sur leurs émissions directes de gaz à effet de serre (scopes 1 et 2 qui sont respectivement les émissions directes provenant des installations fixes ou mobiles situées à l'intérieur du périmètre organisationnel et les émissions indirectes de GES provenant de la consommation de l'électricité achetée, de la chaleur ou de la vapeur) dans leur prochain rapport annuel 2013-2014 [UK Government, 2013]. En France, la loi Grenelle II de 2010 (article 75) oblige les entreprises de plus de 500 salariés à publier les émissions de gaz à effet de serre directes (scopes 1 et 2) [Legifrance, 2014]. Dans le reste du monde, seuls l'Australie, le Canada et le Japon ont imposé entre 2006 et 2008 un reporting obligatoire des émissions de GES pour les gros émetteurs [Carbone4, 2013].

C'est pourquoi on peut s'attendre à ce que ce genre d'initiative gagne plusieurs pays. Il est fort probable que d'ici quelques années, toutes les entreprises (cotées en bourse ou non) devront pouvoir rendre compte de leurs émissions de CO₂. Emissions de CO₂ prove-

nant de toutes parts : des bâtiments de l'entreprise, en passant par ses sous-traitant jusqu'à l'informatique interne et dématérialisée (dans le cloud). Il y a donc un réel besoin car les clients des fournisseurs de service cloud qui doivent rendre compte de leurs émissions de CO₂ doivent pouvoir estimer l'impact de l'IT sous-traité. Il faut donc pouvoir identifier la partie des émissions du data center qui correspond à chaque client. Le fournisseur de service cloud doit pouvoir répondre à la question en mettant en place une comptabilisation carbone tout en étant capable d'identifier dans ses émissions, la part spécifique à chaque client.

Ce mémoire a pour objectif de répondre à cette problématique d'identification de la part spécifique des émissions de CO₂ d'un client du data center en proposant une méthodologie de comptabilité carbone permettant à un data center qui utilise la virtualisation d'associer à chaque client qui utilise ses services ses émissions de CO₂. Cela implique les différentes sous questions suivantes :

- avoir une méthode qui permet de calculer l'impact CO₂ du data center dans son ensemble et de chacun de ses composants ;
- avoir un modèle / méthode qui permet de savoir quelle partie de l'architecture du data center est utilisée par chaque client et en quelle quantité ;
- avoir une méthode qui permet de répartir l'impact global sur chaque client en fonction de son utilisation.

Pour ce faire, l'approche est d'utiliser les éléments de différentes méthodes de comptabilisation déjà existantes et d'appliquer les principes de la méthode ABC (Activity Based Costing) qui est une méthode de gestion permettant de comprendre la formation des coûts en fonctions des activités d'une entreprise. Cette méthode sera adaptée en ne se focalisant pas sur la formation des coûts, mais plutôt la formation des émissions de CO₂.

Ce mémoire sera divisé en deux grandes parties. Une partie concernant l'état de l'art, et une autre concernant la contribution qui ici est la proposition d'une méthodologie. De plus, une partie appendice est présente présentant les facteurs d'émissions et des données génériques des équipements IT et non IT.

La première partie comportera cinq chapitres et permettront de mieux comprendre la partie contribution :

- Chapitre 1 : Les data centers
- Chapitre 2 : La virtualisation
- Chapitre 3 : Une architecture d'entreprise en support à une démarche Green-IT
- Chapitre 4 : Les méthodes de mesures de CO₂
- Chapitre 5 : L'activity based costing

La deuxième partie quant à elle comportera trois chapitres. Le premier expose la méthodologie développée, le deuxième montre l'outil excel réalisé afin de produire des chiffres d'émissions et le troisième est une étude de cas fictive afin de rendre la méthodologie concrète.

- Chapitre 6 : Une méthodologie intégrée pour l'évaluation de l'impact CO₂ de l'infrastructure IT virtualisée
- Chapitre 7 : Prototype pour l'évaluation dans les data centers
- Chapitre 8 : Etude de cas fictive

Première partie

Etat de l'art

Chapitre 1

Les data centers

1.1 Data center et data center «green»

“Un data center est un site physique sur lequel se trouvent regroupés des équipements constituant le système d’information de l’entreprise (ordinateurs centraux, serveurs, baies de stockage, équipements réseaux et de télécommunications, etc.). Il peut être interne et/ou externe à l’entreprise, exploité ou non avec le soutien de prestataires.” [Wikipédia, 2005d] C’est un service généralement utilisé pour remplir une mission critique relative à l’informatique. Il sert à traiter l’information nécessaire aux activités de l’entreprise mais aussi aux activités du grand public.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéresserons plus particulièrement aux data centers dit « green ». “Ceux-ci ont la même utilité que les data centers normaux mais l’éclairage, le système de refroidissement, les systèmes électriques et informatiques sont conçus pour une efficacité énergétique maximale et un impact environnemental minimal.” [Rousse, 2010] La construction tout comme la gestion d’un tel data center implique des technologies et des stratégies de management avancées. Le terme «green» des data centers réfère à une utilisation économiquement responsable de l’énergie et des ressources matérielles. Il implique également le fait d’aspirer à la plus grande efficacité énergétique du data center et des autres composants informatiques.

1.2 Composition d’un data center

Après avoir défini ce qu’était un data center, nous allons maintenant voir de quoi il est composé. Celui-ci comprend des ressources informatiques (serveurs + disques + réseau) dans un bâtiment dédié. Une infrastructure technique assurant la continuité de l’alimentation électrique, du refroidissement et de l’accès télécommunication afin que ces ressources informatiques soient toujours disponibles. Le tout se trouvant dans le bâtiment dont la salle informatique est le plus souvent sécurisée (caméras de surveillance, etc.) pour ne pas permettre l’accès à des personnes non-autorisées. De par son utilisation électrique intense, un data center est souvent situé près d’un point d’accès de très forte puissance électrique et situé près d’un point d’accès à large bande passante.

1.3 Caractéristiques des data centers d’aujourd’hui

Les data centers sont des bâtiments qui doivent se plier aux contraintes du processus informatique et constituer un socle durable pour contribuer au développement de l’entreprise. Ils doivent répondre à des défis sans précédents. En effet, ils doivent pouvoir être flexibles, avoir un taux de disponibilité de plus de 99% et être sûrs. En plus de ces qualités, ils doivent être aussi de plus en plus «green» pour répondre à l’enjeu environnemental.

Selon Tetrea [Tetreau, 2013], la liste des caractéristiques que l’on peut attendre des data centers de nos jours est la suivante :

- Flexibilité : dynamisme pour intégrer de nouvelles données business, techniques ou environnementales ;
- Disponibilité : continuité opérationnelle en cas de défaillances techniques ou humaines ;
- Sûreté : résistance phénomènes naturels ou tout autre problème (incendies, etc.) ;
- Green : limitation de l’empreinte carbone , une optimisation du coût global de possession et une vision transversale de tous les domaines du green (le bâtiment, les économies d’énergie, la gestion des déchets, l’approvisionnement en eau et en électricité).

1.4 Classification des data centers

“Les data centers sont conçus sur deux critères principaux qui sont la haute disponibilité, pour que les applications informatiques ne s’arrêtent jamais et l’efficacité énergétique pour minimiser la facture énergétique et l’empreinte carbone de cette activité[Cattier et al, 2010].” C’est pourquoi, “l’organisme Uptime Institut [Wikipédia, 2013b] a défini une classification qui est reconnue internationalement par les data centers et qui se compose de quatre catégories, appelées « Tier » [Uptime Institute,].” Chaque Tier correspond à des niveaux d’équipements et de disponibilités différents.

- Tier 1 : “fournit un environnement amélioré par rapport à un environnement de bureau et comprend un espace dédié pour les systèmes informatiques ; une alimentation sans interruption (UPS) pour filtrer les pics de courant, les chutes et coupures momentanées ; équipement de refroidissement dédié qui ne sera pas coupé à la fin des heures normales de bureau ; et un générateur pour protéger les fonctions IT contre les coupures de courant prolongées ;”
- Tier 2 : “comprennent une électricité redondante et des composants de refroidissement pour fournir une marge de sécurité accrue contre les problèmes qui résulteraient de défaillances de l’équipement de l’infrastructure du site. Les composants redondants sont généralement des équipements d’alimentation et de refroidissement tel que des UPS supplémentaires, les refroidisseurs et les générateurs à moteur. Ce type d’équipement peut rencontrer des échecs en raison de défauts de fabrication, des erreurs d’installation ou, au fil du temps, à cause du matériel usé ;”
- Tier 3 : “Infrastructure avec tous les composants redondants, tous les systèmes sont en double alimentation, alimentation électrique doublée. Le taux de disponibilité est de l’ordre de 99,98 % (soit de l’ordre d’une heure d’arrêt cumulé par an) ;”

- Tier 4 : “Infrastructure totalement redondante, à tolérance aux pannes . Ce type de centre de traitement atteint et dépasse un taux de disponibilité de 99,99 % (soit moins de 24 minutes d’arrêt cumulé par an). Ce type de data center ne nécessite pas d’arrêt des systèmes, même pour des opérations de maintenance logistique ou de remplacement d’équipements actifs.”

Comme on peut le voir, chaque catégorie de « Tier » apporte davantage de disponibilité et de protection contre d’éventuelles pannes. Mais pour arriver à un tel résultat, les infrastructures de chaque catégorie de Tier sont logiquement différentes. C’est pourquoi, le matériel informatique et la climatisation vont différer. La consommation électrique va donc être plus élevée dans un data center de type «Tier 4» que dans un de type «Tier 1» et donc sera considéré comme moins «green». Lorsque des solutions pour améliorer le coté écologique d’un data center sont mises en place, il ne faut pas que le service offert par ceux-ci soit dégradé (disponibilité) car de nombreuses entreprises recherchent de nos jours une disponibilité quasi permanente. La classification en « Tier » fait partie intégrante du problème que nous voulons traiter vu que celle-ci a un impact sur la consommation électrique. Le tableau 1.1 fait un récapitulatif des différentes catégories de Tier afin d’avoir une vue plus concise de ce que chaque catégorie implique.

| Type de Tier | Caractéristique | Taux de disponibilité | Arrêt annuel | Maintenance à chaud possible | Tolérance aux pannes |
|--------------|-------------------------|-----------------------|--------------|------------------------------|----------------------|
| Tier 1 | Non redondant | 99,671% | 28,8 h | Non | Non |
| Tier 2 | Redondance partielle | 99,749 % | 22 h | Non | Non |
| Tier 3 | Redondance actif/passif | 99,982 % | 1,6 h | Oui | Non |
| Tier 4 | Redondance actif/actif | 99,995 % | 0,4 h | Oui | Oui |

TABLE 1.1 – Récapitulatif des différents Tiers [Wikipédia, 2013b]

1.5 Les différents types d’offres de data center

A l’heure actuelle, on peut distinguer 4 types d’offres dites de data center en fonction de la valeur ajoutée fournie (depuis l’immobilier aux services informatiques).

1. Colocation / Hébergement sec

Dans ce type d’offre, le data center met juste à disposition une surface (sans serveur) alimentée, réfrigérée, sécurisée et irriguée par les gestionnaires du data center. Le client de ce type d’offre vient avec ses propres serveurs et reste donc propriétaire de ses serveurs. Il en assure la maintenance lui même. Ce type d’offre est plutôt destiné à des

clients qui veulent rester assez proches de leurs serveurs pour des raisons opérationnelles et psychologiques en gardant toujours la main dessus.

2. L'offre d'hébergement de données

Il s'agit d'une offre de location de serveurs. Le client utilise des serveurs dédiés ou mutualisés pour héberger ses diverses applications (sites web, messagerie, intranet, backup, etc.) . La valeur ajoutée de ce type d'offre englobe d'une part celle de la colocation, et d'autre part les avantages liés à la mutualisation de l'achat et de l'utilisation des serveurs : en achetant l'ensemble des serveurs, l'opérateur de data center peut bénéficier de tarifs avantageux auprès des constructeurs et choisir les serveurs les mieux adaptés à son infrastructure. Cette solution est notamment utilisée par les entreprises désirant héberger des applications non critiques et aussi principalement par les acteurs de l'internet pour l'hébergement de leur site.

3. L'offre d'infogérance

Le but de l'infogérance est "l'externalisation d'une partie de ses services, c'est-à-dire confier tout ou une partie de la gestion du système d'information à un prestataire informatique tiers." [Pillou, 2015] Dans ce type d'offre, le client externalise tout. Il ne veut plus s'occuper de l'informatique. L'infogéreur effectue la maintenance (corrective, préventive, évolutive) du système d'information. De plus, il gère aussi les applicatifs métier (par exemple la comptabilité, la gestion de la relation client). Par rapport au deux premières offres, la valeur ajoutée est bien visible vu que l'infogéreur doit s'occuper de toute l'informatique de son client.

4. L'offre du cloud computing

"Le client accède de manière souple et dématérialisée à différentes prestations en ligne. Les applications et les données ne se trouvent plus alors sur un serveur physique localisé à un endroit défini, mais dans un « nuage » (cloud en anglais) composé de plusieurs serveurs interconnectés. Le marché du cloud computing se segmente en trois familles d'offres" [Caisse des dépôts, 2014] :

- « IaaS : Infrastructure as a Service » : c'est l'offre la plus basique du cloud. Le prestataire de cloud fournit le matériel serveur, le réseau, l'espace de stockage et gère la virtualisation. L'entreprise reste maîtresse de ses applications, de l'architecture de ses systèmes d'informations, des bases de données et du système d'exploitation ;
- « PaaS : Platform as a Service » : le prestataire fournit l'infrastructure (comme pour l'IaaS) et l'environnement permettant de développer et d'héberger les différentes applications informatiques. Le client possède uniquement les différentes applications dont il a besoin ;
- « SaaS : Software as a Service » : le client externalise les applications, auxquelles

il accède à la demande. Il paie à l'usage, selon le nombre d'utilisateurs et/ou le temps d'utilisation du logiciel.

1.6 Empreinte environnementale des data centers

Selon une étude du Climate Group et GeSI (2008), le nombre de serveurs dans le monde va augmenter de 18 millions en 2007 à 122 millions en 2020 [PrimeEnergyIT, 2011]. De plus, ils auront aussi une puissance de calcul beaucoup plus grande que les modèles actuels présents dans les data centers. La tendance d'augmentation de la consommation énergétique est donc susceptible de continuer.

Cette augmentation entraînera de nombreux effets négatifs sur l'environnement en particulier pour ceux qui résultent de :

- L'utilisation d'énergie et des ressources nécessaires pour la fabrication des serveurs et autres équipements utilisés dans les data centers ;
- La consommation énergétique des data centers et des activités associées à leur fonctionnement (refroidissement, etc.) ;
- La gestion des équipements en fin de vie.

Toujours selon l'étude du Climate Group et GeSI (2008), l'empreinte environnementale des data centers, incluant les émissions carbone relatives à l'utilisation et la fabrication des équipements, devrait au moins tripler et passer de 78 millions de tonnes équivalent CO₂ en 2002, à 259 millions de tonnes équivalent CO₂ en 2020. L'étude suppose que 75% des émissions sont liées à l'utilisation des équipements. Dans le monde, les émissions attribuées aux TIC représenteraient environ 2% des émissions totales de l'activité humaine au niveau mondial. Ce chiffre pourrait monter jusqu'à 6% d'ici 2020 si aucunes mesures ne sont prises par les gouvernements afin de rendre les data centers plus écologiques. Selon Climate Group et GeSI, les data centers à eux seuls représentent environ 0.3% des émissions mondiales.

1.7 Nécessité des data centers green

Selon Solucom [Debergues, 2009], de nos jours, tout ce qui touche au green a le vent en poupe et le secteur de l'informatique n'échappe pas à ça. Les dirigeants de l'informatique ont de plus en plus la préoccupation d'essayer de concilier le développement durable et la production informatique. Mais ce qui se cache surtout derrière cette préoccupation, c'est d'abord et avant tout de réduire les coûts qui agissent comme catalyseur green sur les CIO. En effet, au cours de ces dix dernières années, les besoins en matériels informatiques et surtout en serveurs pour stocker et faire tourner le business de l'entreprise, entraînant une forte hausse de la consommation électrique des data centers. "La dépense électrique annuelle d'un grand data center peut ainsi dépasser plusieurs millions d'euros." [Debergues, 2009] C'est pourquoi des politiques green en matière de gestion de l'énergie peuvent faire faire des économies aux data centers.

Malgré la forte augmentation des besoins informatiques, "les CIO n'ont mesuré que progressivement l'explosion de leur facture d'électricité. Pour réduire cette facture, la première

difficulté est la connaissance de la consommation électrique dans les data centers. Notamment lorsque le poste de coût « énergie » est à la charge des services généraux. Seconde difficulté : la lisibilité de ces coûts. En effet, la part de la facture d'électricité relative à la consommation des équipements IT n'est souvent pas séparée de celle des infrastructures de climatisation et de distribution électrique nécessaires à leur fonctionnement." [Debergues, 2009] Malgré ces obstacles, on assiste à une prise de conscience chez les CIO, et les notions d'informatique green sont aujourd'hui bien accueillies au sein des entreprises. Le Green IT Report 2009, étude réalisée par Symantec auprès de 1 052 décideurs informatiques, montre que la plupart des sondés se disent intéressés ou très intéressés par l'acquisition d'équipements électrique-ment efficaces (92%), et par une réorganisation de leur data center pour un refroidissement et une consommation d'énergie optimisés (84%). [Debergues, 2009]

L'empreinte écologique globale des data centers ne cessent de grandir et ce à une vitesse élevée. Mais cette augmentation peut être réduite grâce à des mesures qui seront détaillées dans la suite de ce document.

Les impacts environnementaux d'un data center se concentrent essentiellement lors de deux phases :

1. La fabrication : les bâtiments, les équipements liés au bâtiment (groupes électrogènes, climatisation, etc.) et les équipements informatiques et télécoms que le data center contient.
 - (a) La fabrication concerne les pollutions et l'épuisement des stocks de ressources non renouvelables ;
 - (b) Lorsqu'un data center achète des équipements informatiques, celui-ci peut mettre en place une politique d'achat « green » afin de choisir les fournisseurs qui rentrent dans leur politique écologique.
2. L'utilisation du data center
 - (a) L'utilisation se traduit essentiellement par des émissions de gaz à effet de serre (liées à la production de l'énergie consommée par le data center) et des émissions des déchets d'équipements électriques et électroniques.

Selon Tristan Richard [Richard,], il y a une multitudes de drivers qui boostent les data centers à devenir de plus en plus écologique :

- Une majorité des data centers ne répondent plus aux besoins (puissance, redondance, etc.) et normes actuelles ;
- Un besoin de justifier des économies ;
- Une explosion du coût de l'énergie et des matières premières qui poussent à l'optimisation ;
- Une prise de conscience de la proportion des coûts d'exploitation dans le coût global du data center ;
- La crise financière ;
- Les futures pénuries des énergies fossiles ;
- La conformité à la législation : les data centers vont bientôt être dans le collimateur des autorités. On peut s'attendre à ce à ce que d'ici quelques années, sous la pression des autorités, les considérations environnementales soient centrées dans la réflexion des data centers ;

— La valorisation de l’entreprise ;

A côté de la diminution de l’empreinte écologique, un autre aspect qui prendra de l’ampleur dans les prochaines années est le reporting des émissions de CO₂. En effet, dans quelques années, on peut supposer que les entreprises auront le devoir et l’obligation de mettre au grand jour les émissions qu’elles consomment. “Cette mesure est déjà d’application en Grande-Bretagne où toutes les entreprises cotées sur le marché principal de la Bourse de Londres devront déclarer leurs niveaux d’émissions de gaz à effet de serre. Le Royaume-Uni est le premier pays à rendre obligatoire pour les entreprises l’intégration de données d’émissions de l’ensemble de l’organisation dans leurs rapports annuels. L’introduction de ces données aux rapports, à la suite de consultations menées auprès des principales entreprises, permettra aux investisseurs de voir quelles compagnies gèrent efficacement les coûts cachés à long terme des émissions de gaz à effet de serre.” [Brodhag, 2012]

1.8 Mesures à prendre pour envisager un data center green

Le green data center vise, comme son nom l’indique, à repenser les data centers en vue de réduire leur impact sur l’environnement. Cette approche nécessite d’agir sur trois axes clés :

- Le contenant : le centre d’hébergement accueillant le cœur du système d’information et fournissant les conditions nécessaires au bon fonctionnement des équipements IT (climatisation, électricité, groupes électrogènes, sécurité) ;
- Le contenu : les équipements IT eux-mêmes (serveurs, équipements réseaux, baies de stockage, robotique de sauvegarde, etc.) ;
- Le fonctionnement : supervision, administration à la fois du contenant et du contenu.

Sur chaque axe, des efforts sont possibles et fourniront des résultats plus ou moins importants. Toutefois, ce n’est qu’une approche globale, en combinant l’ensemble des axes, qui permettra d’obtenir les meilleurs résultats.

1.9 Les différentes mesures d’efficacité énergétique d’un data center

Il existe plusieurs indicateurs de mesures de l’efficacité énergétique. La plus connue étant le PUE, mais The Green Grid [The Green Grid, 2012] a récemment proposé trois nouvelles mesures qui sont : le Green Energy Coefficient (GEC) et l’Energy Reuse Factor (ERF) afin de mesurer et améliorer la performance des data centers.

1. PUE – Power Usage Effectiveness : mesure de l’efficacité énergétique ;

$$\text{PUE} = \frac{\text{Energie totale consommée par le data center}}{\text{Energie consommée par les systèmes informatiques}} \quad (1.1)$$

2. GEC – Green Energy Coefficient : mesure qui permet de quantifier la partie de l'énergie d'une installation qui provient de sources vertes ;

$$\text{GEC} = \frac{\text{Energie verte consommée par le data center}}{\text{Energie totale consommée par le data center}} \quad (1.2)$$

3. ERF – Energy Reuse Factor : mesure qui identifie la partie de l'énergie qui est exportée pour être réutilisée en dehors du centre de données ;

$$\text{ERF} = \frac{\text{Energie réutilisée en dehors du data center}}{\text{Energie totale consommée par le data center}} \quad (1.3)$$

1.10 La virtualisation : au centre des data center 3.0

Selon Cisco [Cisco, 2007], les data centers tentent à évoluer au fur et à mesure des années. Les observations de Cisco montrent une évolution des data centers en 3 phases. Rien de cela n'est officiel mais donne un bon aperçu de l'évolution des technologies utilisées à l'intérieur des data centers.

Le Data Center 1.0 représentait la centralisation à l'extrême autour de mainframes accessibles par les utilisateurs au travers de différents terminaux.

Ensuite, l'arrivée des technologies clients/serveurs a amené les data center 1.0 vers les data centers 2.0. Ils évoluent ainsi d'une architecture hautement centralisée à une autre hautement distribuée

Enfin, le data center 3.0 va combiner le meilleur de ces deux mondes (1.0 et 2.0) en permettant de recentraliser les serveurs et le stockage autour d'une plateforme réseaux hautement disponible et évolutive en temps réel tout en préservant les avantages et la souplesse d'une architecture distribuée. La virtualisation dont nous allons parler dans le chapitre 2 fait partie intégrante des nouveaux data centers. Le data center 3.0 repose sur 3 piliers :

1. La consolidation :
 - La consolidation de serveurs permet de réduire le TCO (« Total Cost of Ownership » ou coût total de possession), le temps de maintenance, simplifier l'administration de l'infrastructure, sécuriser l'architecture systèmes et réseaux et mettre en œuvre des PRA (Plan de Reprise d'Activité).
2. La virtualisation :
 - Permet d'optimiser les ressources IT/investissements.
3. L'automatisation :
 - L'efficacité de l'automatisation IT améliorera l'utilisation des ressources tout en libérant les administrateurs IT pour qu'ils puissent innover sur l'aspect des métiers de leur organisation

Chapitre 2

La virtualisation des ressources

2.1 Définition de la virtualisation

“La virtualisation consiste à faire fonctionner un ou plusieurs systèmes d’exploitation/applications comme un simple logiciel sur un ou plusieurs ordinateurs-serveurs/système d’exploitation, au lieu de ne pouvoir en installer qu’un seul par machine. Ces ordinateurs virtuels sont appelés serveur privé virtuel (Virtual Private Server ou VPS) ou encore environnement virtuel (Virtual Environment ou VE).” [Wikipédia, 2005a]

En d’autres mots, la virtualisation est un processus qui va permettre de masquer les caractéristiques physiques d’une ressource informatique de manière à simplifier les interactions entre cette ressource et d’autres systèmes, d’autres applications et les utilisateurs.

La virtualisation repose sur trois éléments importants :

1. L’abstraction des ressources informatiques ;
2. La répartition des ressources par l’intermédiaire de différents outils, de manière à ce que celles-ci puissent être utilisées par plusieurs environnements virtuels ;
3. La création d’environnements virtuels.

La figure 2.1 illustre une architecture typique sans virtualisation. Dans cette configuration, on retrouve une machine physique sur laquelle est installé un système d’exploitation (OS) sur lequel on installe un ou plusieurs logiciels qui ont chacun une ou plusieurs fonctionnalités ou rôles qui rendent des services.

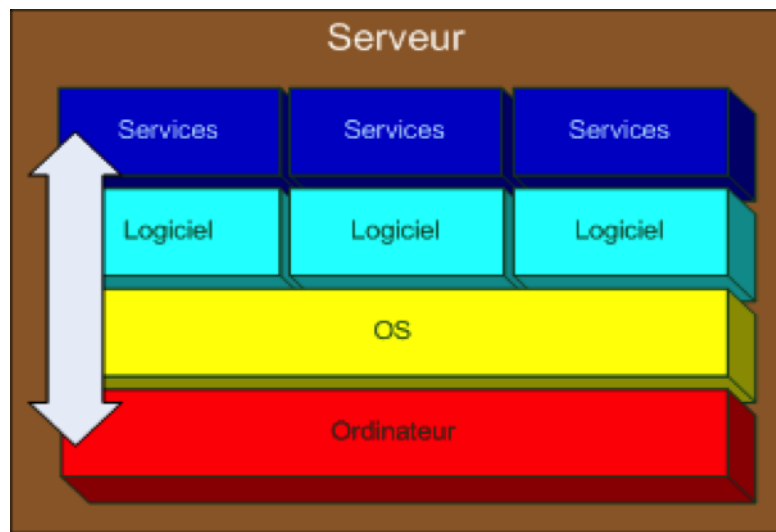


FIGURE 2.1 – Architecture typique sans virtualisation [Culture Informatique, 2013]

Maintenant, voyons ce qu’un logiciel de virtualisation peut apporter. “Le logiciel de virtualisation rend comme service de mettre à disposition des machines virtuelles. La mission du gestionnaire est d’installer l’OS et les logiciels adéquats sur ces machines virtuelles pour qu’elles rendent les services souhaités de la même manière que si elles avaient été de vraies machines physiques.” [Culture Informatique, 2013]

Dans la Figure 2.2, on peut voir qu’il y a une couche OS sur l’ordinateur physique. Mais cette couche OS est parfois intégrée directement dans le logiciel d’hypervision tel que ESXi de VMware. De plus, il n’y a aussi qu’un seul ordinateur physique, mais en réalité, on va mettre plusieurs ordinateurs physiques car si l’un tombe en panne, les autres se distribueront le travail qui lui était attribué.

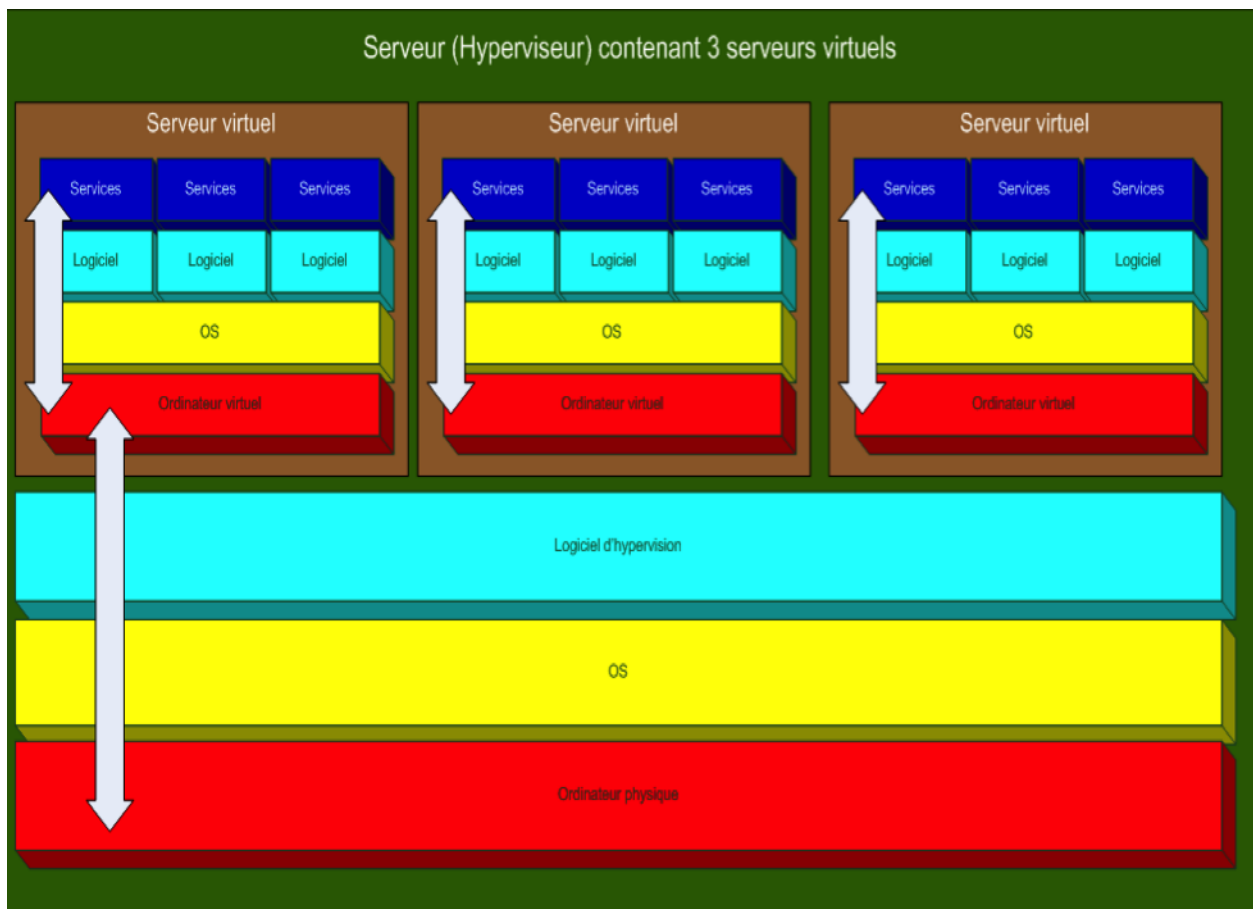


FIGURE 2.2 – Architecture typique avec virtualisation [Culture Informatique, 2013]

2.2 Les différentes techniques de virtualisation

Les différentes sous-section suivantes proviennent d'un état de l'art concernant la virtualisation [Bonnet, 2008]. Elle reprennent les concepts clés afin de comprendre les différentes techniques de virtualisation.

2.2.1 Virtualisation complète

La virtualisation complète (full virtualization), dénommée ainsi par opposition à la paravirtualisation définie à la section suivante, consiste à émuler l'intégralité d'une machine physique pour le système invité. Le système invité « croit » s'exécuter sur une véritable machine physique. Le logiciel chargé d'émuler cette machine s'appelle une machine virtuelle, son rôle est de transformer les instructions du système invité en instructions pour le système hôte. En effet, comme le montre la Figure 2.3 page suivante, la machine virtuelle est un programme comme un autre du point de vue du système hôte, au même titre qu'un navigateur Internet ou un traitement de texte. Les programmes utilisateurs n'ont pas d'accès direct au matériel, mais uniquement aux couches d'abstraction. La machine virtuelle émule donc de manière logique (c'est-à-dire avec du code) tout le matériel habituel de l'architecture de

l'ordinateur cible. Sur la Figure 2.3, le rectangle en fond vert est le système d'exploitation, seule partie à avoir un accès direct au matériel, ici représenté avec un fond bleu. Le rectangle en fond blanc est une application utilisateur, qui ne peut utiliser que la couche d'abstraction du système d'exploitation pour accéder indirectement au matériel.

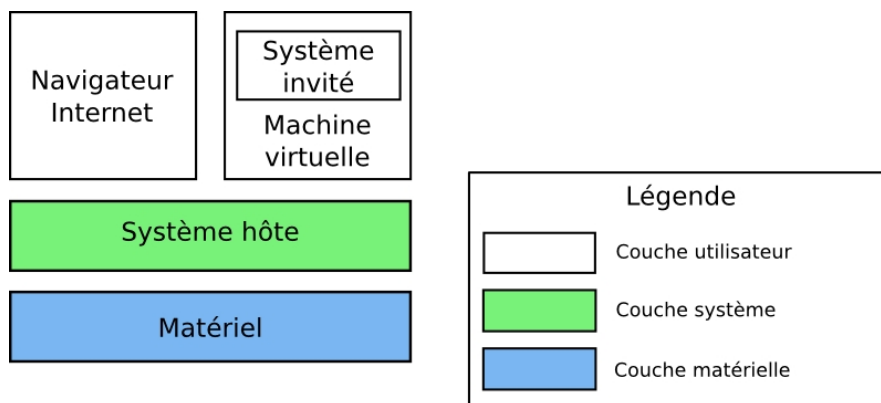


FIGURE 2.3 – Virtualisation complète

2.2.2 Para-virtualisation

La paravirtualisation (paravirtualization ou encore para-virtualization) est très proche du concept de la virtualisation complète, dans le sens où c'est toujours un système d'exploitation complet qui s'exécute sur le matériel émulé par une machine virtuelle, cette dernière s'exécutant au dessus d'un système hôte. Toutefois, dans une solution de paravirtualisation, le système invité est modifié pour être exécuté par la machine virtuelle. Les modifications effectuées visent à rendre le système émulé « au courant » du fait qu'il s'exécute dans une machine virtuelle. De ce fait, il pourra collaborer plus étroitement avec le système hôte, en utilisant une interface spécifique, au lieu d'accéder au matériel virtuel via les couches d'abstraction. En pratique, un système paravirtualisé possède quelques pilotes de périphériques et sous-systèmes modifiés, qui lui permettent de communiquer directement avec la machine virtuelle sans passer par la couche d'abstraction.

La Figure 2.4 montre la structure d'une machine virtuelle et d'un système hôte supportant la paravirtualisation. Les pilotes non modifiés interagissent toujours avec le matériel émulé par la machine virtuelle (rectangle bleu ciel), alors que les pilotes modifiés communiquent directement les fonctions de la machine virtuelle (rectangle jaune). La simplification qui en résulte permet au système invité de collaborer plus efficacement avec l'hôte : les parties critiques du système communiquent presque directement avec le système hôte, en contournant les couches d'abstraction virtuelles (i.e. le matériel émulé). Le reste de l'architecture est inchangé, la machine virtuelle est toujours une application utilisateur (rectangle blanc) et le système d'exploitation (rectangle vert) est toujours le seul à avoir un accès privilégié au matériel (rectangle bleu).

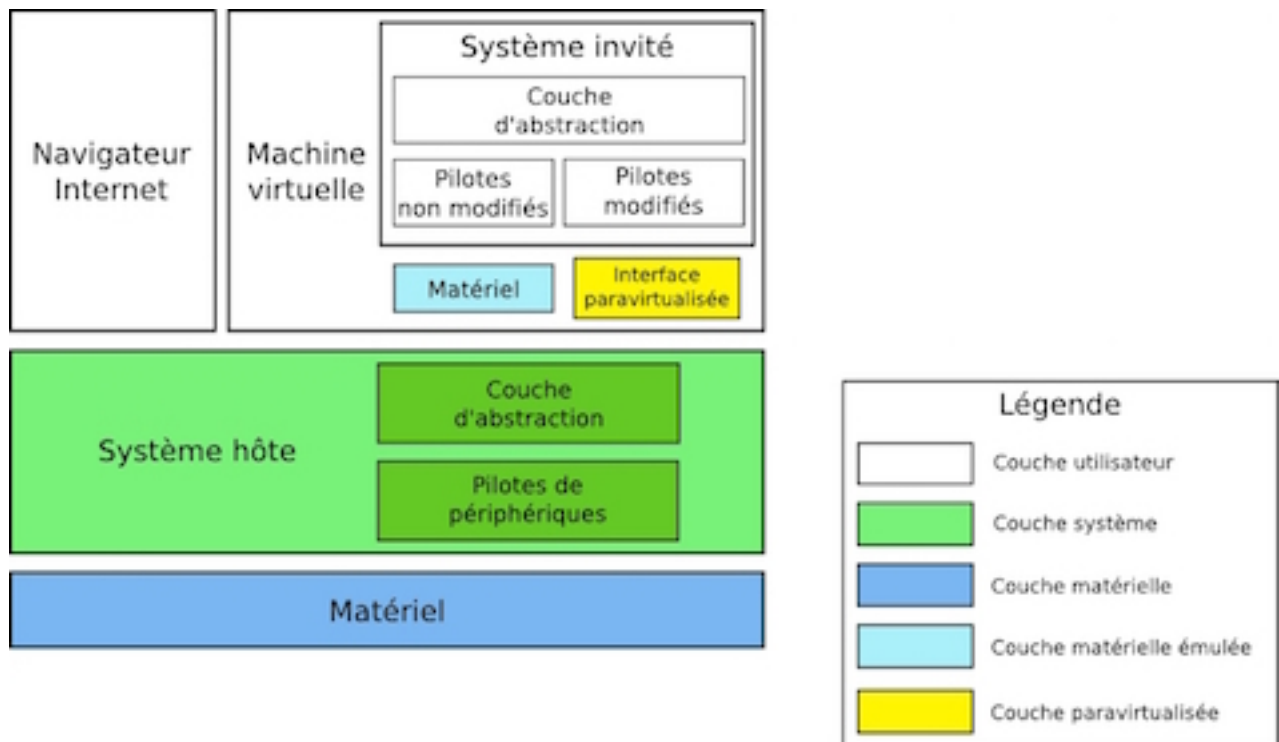


FIGURE 2.4 – Para-virtualisation

2.2.3 Hyperviseurs

L'utilisation d'un hyperviseur (hypervisor) est en quelque sorte l'évolution logique de la paravirtualisation, si l'on recherche encore une amélioration des performances. Dans les technologies précédentes, le système hôte était le seul à avoir un accès direct au matériel ; avec un hyperviseur, le système hôte partage cet accès avec les systèmes invités. Au démarrage de l'ordinateur, c'est normalement le système d'exploitation qui prend la main et contrôle le matériel. Dans le cas de l'utilisation d'un hyperviseur, c'est un système minimaliste - l'hyperviseur - qui prend le contrôle du matériel. Ensuite, il fait appel à un système d'exploitation complet, qui sera donc exécuté par dessus l'hyperviseur. Ainsi, le système d'exploitation doit passer par l'hyperviseur pour tout accès au matériel. On peut donc très facilement instancier un deuxième système d'exploitation, qui passera lui aussi par l'hyperviseur pour l'accès au matériel. Comme les systèmes d'exploitation doivent obligatoirement passer par ce dernier pour tout accès au matériel, l'hyperviseur peut s'assurer qu'ils n'accèdent qu'aux ressources autorisées, sans perturber le fonctionnement des autres systèmes.

La Figure 2.5 détaille le principe de fonctionnement de l'hyperviseur. À la différence des technologies exposées précédemment, il n'y a cette fois pas d'accès direct au matériel (rectangle bleu) pour le système d'exploitation, uniquement une couche d'abstraction minimale fournie par l'hyperviseur (rectangle vert). L'hyperviseur est le seul à avoir un accès privilégié au matériel. Dans cette représentation, les systèmes cohabitent au même niveau de privilège, uniquement régulés par l'hyperviseur. Toutefois, selon les implémentations, il y a souvent un système privilégié, qui est en général le premier système démarré par l'hyperviseur. Ce système est alors autorisé à modifier les paramètres de l'hyperviseur ou à instancier de nou-

veaux systèmes invités. À l’opposé, sur d’autres implémentations, la différence entre hôte et invité est inexistante, tous les systèmes ont les mêmes privilèges et l’hyperviseur est alors contrôlé d’une autre manière.

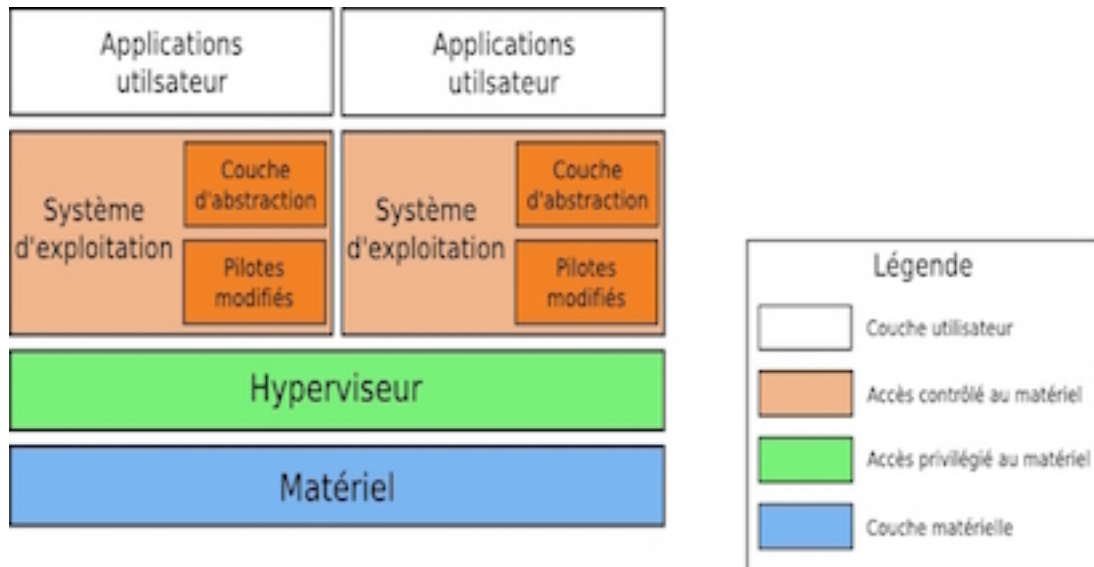


FIGURE 2.5 – Hyperviseur

2.2.4 Cloisonnement

Une autre pratique répandue dans le domaine de la virtualisation est le cloisonnement. Derrière ce nom se cachent plusieurs technologies visant à séparer fortement les processus s’exécutant sur un même système d’exploitation. Le cloisonnement vise à isoler chaque processus dans un conteneur dont il est théoriquement impossible de sortir. Un processus isolé de la sorte ne saura pas quels autres processus s’exécutent sur le même système, et n’aura qu’une vision limitée de son environnement. Le but principal de cette technologie est d’améliorer la sécurité du système d’exploitation et des applications.

Selon les implémentations, cela peut aller du simple « emprisonnement » dans un environnement volontairement minimal à une image complète du système accessible uniquement au processus isolé. La plupart des systèmes d’exploitation basés sur UNIX proposent un moyen d’isoler les processus. Le plus répandu (et le plus ancien) est la commande «chroot», qui permet de créer un environnement minimal contenant uniquement ce qui est strictement nécessaire pour exécuter le programme isolé.

2.3 Les différents hardwares à virtualiser

2.3.1 La virtualisation de postes de travail

C’est l’application de la virtualisation la plus connue. Elle permet de déployer un système d’exploitation invité qui s’exécute comme une application sur la machine hôte afin de tester des systèmes sur différentes configurations matérielles.

2.3.2 La virtualisation des serveurs

“La virtualisation des serveurs consiste à masquer les ressources du serveur, c’est à dire le nombre et les caractéristiques de chaque système d’exploitation pour les utilisateurs de ce serveur. L’administrateur du serveur va utiliser un logiciel grâce auquel il va diviser un serveur physique (constitué ou non de plusieurs machines distinctes) en plusieurs environnements virtuels isolés les uns des autres. Les environnements isolés sont parfois appelés serveurs privés virtuels, hôtes, instances, conteneurs ou émulations[Santy, 2010].”

La virtualisation de serveurs s’inscrit dans une tendance globale qui tend à promouvoir la virtualisation au sein des entreprises en faisant notamment appel à la virtualisation de stockage, à la virtualisation de réseaux et à la virtualisation des applications.

2.3.3 La virtualisation de stockage

“La virtualisation du stockage aussi appelée abstraction du stockage, sépare la présentation logique et la réalité physique des ressources de stockage. C’est à dire que le client accède à ces ressources indépendamment des protocoles utilisés. Cette technique consiste à masquer la disparité des ressources de stockage et à les présenter comme un volume logique homogène. Cette couche d’abstraction intermédiaire agit comme un broker de capacité : elle fournit de l’espace de stockage aux applications, fait cohabiter des environnements hétérogènes dans une même représentation, permet l’ajout de capacité à la volée, et laisse l’administrateur appliquer une politique unifiée de gestion des données.” [Bonnet, 2002]

Les avantages de la virtualisation de stockage sont :

- d’adjoindre un périphérique de stockage supplémentaire sans interruption des services ;
- de regrouper des unités de disques durs de différentes vitesses, de différentes tailles et de différents constructeurs ;
- de réallouer dynamiquement de l’espace de stockage. Ainsi, un serveur nécessitant un espace de stockage supplémentaire pourra rechercher des ressources non allouées sur le disque logique. Inversement, un serveur nécessitant moins d’espace de stockage pourra libérer cet espace et le rendre disponible pour d’autres serveurs.

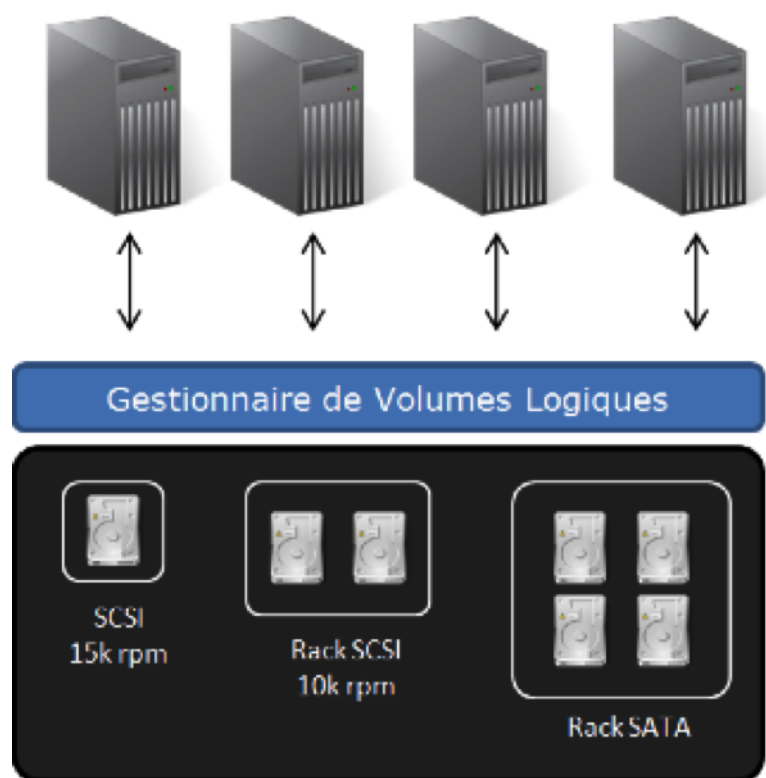


FIGURE 2.6 – Virtualisation de stockage

2.3.4 La virtualisation du réseau

“La virtualisation du réseau est la reproduction logicielle complète d’un réseau physique. Les réseaux virtuels offrent les mêmes fonctions et garanties que les réseaux physiques, avec les avantages opérationnels et l’indépendance du matériel assurés par la virtualisation, à savoir un provisionnement rapide, un déploiement sans interruption de service, une automatisation de la maintenance et un support pour les applications existantes et nouvelles. La virtualisation du réseau présente les périphériques et services réseau logiques (ports, commutateurs, routeurs, pare-feu, répartiteurs de charge, VPN et autres) aux charges de travail connectées. Les applications du réseau virtuel s’exécutent de la même manière que si elles se trouvaient sur un réseau physique.” [VMware,]

2.3.5 La virtualisation d’application

“La technologie de virtualisation d’applications (anciennement appelée publication d’applications ou server-based computing) permet de mettre à disposition les applications comme un service en s’affranchissant des contraintes techniques de déploiement. L’ensemble des données de l’utilisateur, ainsi que les applications, sont hébergées dans un data-center sécurisé pour une meilleure disponibilité et une sécurité accrue des données.” [Systancia,] Les applications virtualisées sont donc mises à disposition sous forme virtualisées et l’exécution d’une application se déroule dans le data center mais seul le visuel de l’application est envoyé

au client. “Autrement dit, l'utilisateur peut accéder à ses applications de n'importe où et à tout moment par un navigateur internet avec une amélioration de la qualité de service.” [Systancia,]

2.4 Les avantages de la virtualisation

Nous allons maintenant passer en revue les avantages et inconvénients de la virtualisation dans les data centers. Ces avantages et inconvénients sont en rapport avec les data centers mais peuvent être de façon générale appliqués à la virtualisation dans son ensemble.

1. Une optimisation de l'infrastructure : “la virtualisation permet d'optimiser la charge de travail des serveurs physiques. En effet, il y a quelques années, la relation une application - un serveur était encore largement répandue. Cependant, cette relation introduit un gaspillage important des ressources puisqu'on estime que la charge moyenne d'un serveur se situe entre 5% et 15%. L'idée est alors de récupérer ces ressources disponibles afin d'en faire bénéficier d'autres applications. La virtualisation va apporter une solution efficace : plutôt que de faire tourner une seule application sur le serveur physique, on va installer sur celui-ci plusieurs serveurs virtuels exécutant chacun une application bien précise, et c'est le logiciel de virtualisation qui se charge de répartir équitablement les ressources entre les différentes instances. De cette manière, comme le montre la Figure 2.7, on optimise le rendement de chacun des serveurs physiques ;” [Santy, 2010]

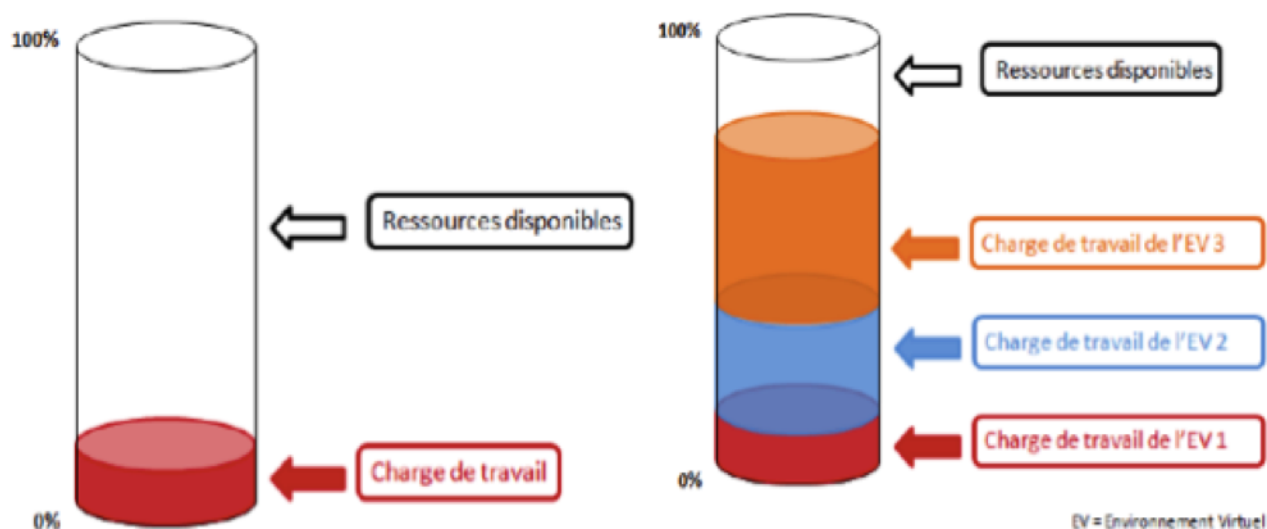


FIGURE 2.7 – Rendement d'un serveur sans virtualisation (à gauche) et avec virtualisation (à droite) [Santy, 2010]

2. Réduction de chaleur : tous les serveurs en activité dans un data center génèrent énormément de chaleur et demandent une bonne climatisation. Pour réduire la quantité de chaleur, la virtualisation peut être utilisée. En effet, grâce à celle-ci, le nombre de serveurs physiques diminuera et ainsi produira moins de chaleur ;

3. Réduction des coûts : le matériel est souvent un coup assez élevé dans les data centers. Ainsi, en réduisant la quantité de matériels, les coûts vont être diminués et qui dit moins de matériel, dit aussi moins d'électricité consommée par le data center ;
4. Redéploiement rapide : lorsqu'un serveur tombe en panne dans un cas où la virtualisation n'est pas présente et qu'il faut remettre en service les applications présentes sur le serveur peut prendre un certain temps. Avec la virtualisation, le redéploiement peut se faire en un minimum de temps ;
5. Sauvegardes plus faciles : grâce à la virtualisation, on peut faire des sauvegardes complètes du serveur virtuel mais on peut aussi effectuer des sauvegardes instantanées des machines virtuelles. Les machines virtuelles peuvent être déplacées d'un serveur à un autre et redéployées plus facilement et plus rapidement. Les sauvegardes instantanées peuvent être prises tout au long de la journée afin d'assurer une presque continuité dans les sauvegardes ;
6. Aspects «green» : grâce à la réduction de l'empreinte carbone due à la réduction du nombre de serveurs, l'aspect green est renforcé et amélioré ;
7. Tester de manière plus efficace : si lors d'un test, une erreur se produit, ce n'est pas grave. En effet, on peut facilement revenir un snapshot en arrière grâce à la virtualisation et ainsi repartir de l'avant comme si l'erreur ne s'était pas produite ;
8. Moins de problèmes de compatibilité : grâce à l'abstraction entre le logiciel et le matériel, personne n'est lié à un fournisseur particulier. En effet, les machines virtuelles ne se soucient pas du matériel sur lequel elles sont ;
9. Etendre la durée de vie de vieilles applications : "de nombreuses entreprises ont toujours de vieilles applications encore en cours d'exécution dans leur environnement. Mais souvent, elles ne fonctionnent pas sur un système d'exploitation moderne avec du matériel plus récent. L'équipe informatique a peur d'y toucher car la société qui l'a créée n'existe plus. Grâce à la virtualisation et en encapsulant l'application et son environnement, on peut étendre sa durée de vie, maintenir sa disponibilité et se débarrasser des vieilles machines." [Marshal, 2011]

A côté de ces nombreux avantages, la virtualisation a aussi ses défauts comme nous allons le voir ci-dessous :

1. Il faut avoir recours à des machines puissantes. Comme nous l'avons vu précédemment, la virtualisation permet de réaliser des économies puisque moins de machines physiques sont nécessaires. Mais, les outils de virtualisations sont des applications qui sont très gourmandes en ressources et qui nécessitent des machines puissantes. On peut bien évidemment utiliser la virtualisation sur des machines moins puissantes, mais un manque de mémoire ou de capacité CPU peut faire chuter les performances ;
2. Une complexité accrue de l'analyse d'erreur. La virtualisation d'un serveur implique des changements importants dans l'infrastructure du système car la couche de virtualisation vient s'ajouter aux autres ;
3. Certaines applications ne sont pas virtualisables. Une majorité d'applications se comportent normalement dans un environnement virtualisé mais pour certaines, on ne sait pas comment elles vont se comporter. Par exemple, les bases de données. En effet, elles

ont recours à de nombreux accès disques et le délai d'accès supplémentaire introduit par la virtualisation peut dans certains cas rendre l'application inutilisable ;

4. La sécurité de l'infrastructure dépend de la sécurité de l'hyperviseur. L'Hyperviseur de par sa technologie engendre de nouveaux risques comme [Wikipédia, 2013a] :
 - Les attaques entre machines virtuelles ;
 - La fuite d'information d'une machine virtuelle à une autre ;
 - La prise de contrôle du système hôte ;
 - etc.

2.5 Facturation des ressources d'une application à l'utilisateur

La virtualisation entraîne un vrai challenge pour identifier les ressources réellement consommées par une application.

En effet, dans un environnement de production classique, généralement, la facturation des ressources informatiques est faite par services en fonction des ressources utilisées ou demandées par ces différents services. “Le problème dans un environnement virtualisé est que les ressources sont mutualisées. Ainsi, et pour éviter les abus, une entreprise se doit de définir un modèle de coûts afin de refacturer aux mieux les différents services en fonction de leur utilisation des ressources.” [Chaffaux, 2011]

Chapitre 3

Une architecture d'Entreprise en support à une démarche GreenIT

3.1 Un modèle d'architecture d'entreprise

“L’Architecture d’Entreprise est la logique structurante pour les processus métiers et l’infrastructure informatique, reflétant les exigences d’intégration et de standardisation du modèle opératoire de l’entreprise. L’architecture d’entreprise fournit une vision à long terme des processus, des systèmes et des technologies de l’entreprise afin que les projets individuels puissent construire des capacités et non pas simplement répondre à des besoins immédiats.” [Ross, 2006]

Une architecture d’entreprise est développée car les dirigeants d’entreprises ont des préoccupations concernant le business et l’IT au sein de l’organisation. L’architecte désigné afin de mettre en place une telle architecture doit essayer de répondre aux préoccupations des dirigeants en faisant des compromis. L’architecture d’entreprise est une description formelle d’un système organisé d’une manière à ce qu’elle supporte le fonctionnement du système et son évolution. Elle définit les composants du système en créant un plan qui va mettre en évidence les différents sous-systèmes implémentés afin de faire fonctionner le système principal. Elle permet aussi de gérer l’investissement informatique qui répond aux besoins de l’entreprise.

“Une bonne modélisation de l’architecture est avant tout une question de bon sens. L’architecture d’entreprise vise à faire évoluer le système d’information dans son ensemble, afin de garantir sa cohérence vis-à-vis des objectifs stratégiques et métiers de l’entreprise, tout en prenant en compte les contraintes internes et externes ainsi que les opportunités technologiques.” [Badetz, 2013]

Le but [Allaire,] d’une entreprise d’architecture est donc de :

- Documenter les états actuels et futurs des systèmes de l’entreprise pour la rendre visible et facile à comprendre ;
- Supporter et intégrer la planification business et IT ;
- Fournir un contexte d’affaires pour la priorisation et le contenu des projets.

3.2 ArchiMate

3.2.1 Qu'est ce qu'est ArchiMate

ArchiMate est un langage de modélisation de l'Open Group s'apparentant à UML mais qui est conçu pour réaliser une architecture d'entreprise. Il fournit des outils pour aider les architectes d'entreprise dans la description, l'analyse et la visualisation des relations entre les domaines d'activités.

En architecture, les architectes utilisent un plan (dessin) qui décrit quelle sera la forme du bâtiment, etc. En informatique, on utilise des framework pour décrire l'entreprise. ArchiMate (mais il y en a d'autres), offre un langage commun pour décrire la construction et l'exploitation des processus business, les structures organisationnelles, les flux d'information, les systèmes IT et l'infrastructure technique. Un langage commun offre de nombreux avantages en terme de communication. En effet, dès lors qu'un langage est commun entre différents acteurs, la communication (théoriquement) est plus facile entre ceux-ci et permet un alignement plus aisé.

Le but d'ArchiMate est de faciliter une cohérence entre les différentes couches et les produits-biens de l'entreprise qui met en place un tel système grâce à une meilleure communication.

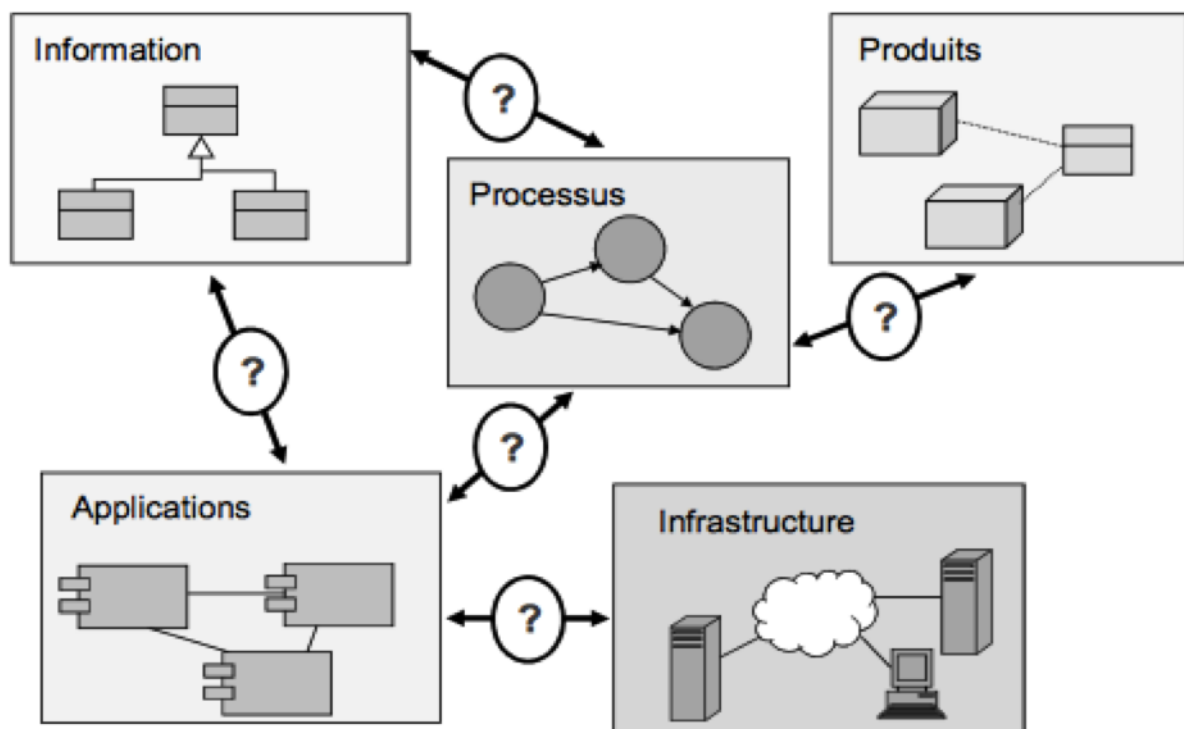


FIGURE 3.1 – But d'ArchiMate : Assurer une cohérence entre les différents éléments de l'architecture

3.2.2 ArchiMate : un langage de modélisation

Cette section sera organisée comme suit : dans un premier temps, nous nous intéresserons à décrire en bref les différentes couches et les éléments de chaque couche. Ensuite, nous identifierons les éléments importants (cases dans la Figure 3.2) dans le cadre de notre problème.

3.2.2.1 Les éléments d’ArchiMate

La structure du framework permet de modéliser l’entreprise de différents points de vue où la position à l’intérieur des cellules montre les inquiétudes des stakeholder. Un stakeholder peut typiquement avoir des inquiétudes qui couvre plusieurs cellules.

Les dimensions du framework [The Open Group, 2013] sont les suivantes :

- Les couches : les trois niveaux de couches à partir desquelles une entreprise peut être modélisée - business, application et technologie ;
 - ☐ La couche business offre les produits et services à un client extérieur, qui sont réalisés dans l’organisation par un processus business ;
 - ☐ La couche applicative supporte la couche business avec des services applicatifs qui sont réalisés par les logiciels ;
 - ☐ La couche technologie offre des services d’infrastructure (processus de calcul, stockage and services de communication) nécessaires pour supporter les applications, réalisées par les ordinateurs, les équipements de communication et les logiciels système.
- Les aspects ;
 - ☐ L’aspect structure active représente les concepts structurels (acteurs business, composants d’application et les équipements qui montrent le comportement actuel ;
 - ☐ L’aspect comportement représente le comportement (processus, fonctions, événements et services) effectué par les acteurs ;
 - ☐ L’aspect structure passive représente les objets sur lesquels le comportement est effectué.

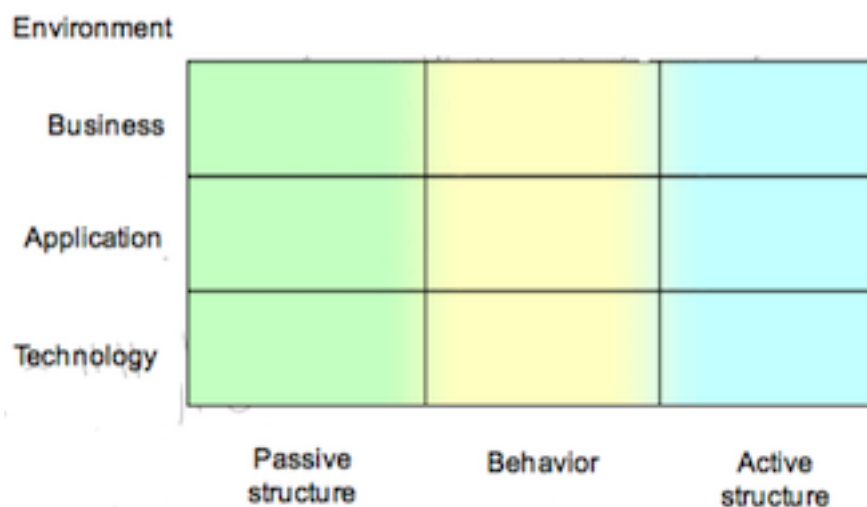








FIGURE 3.2 – Organisation du framework ArchiMate en cellule

3.2.2.2 Les concepts d'ArchiMate

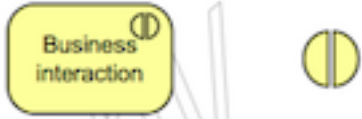


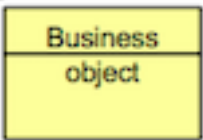
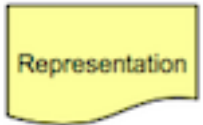


Dans cette section, nous allons passer en revue les différents concepts d'ArchiMate afin d'avoir une connaissance lorsque nous utiliserons ces quelques concepts dans la suite.

Nous allons passer en revue les différentes couches présentes dans Archimate. Les Tables 3.1, 3.2, 3.3 montrent respectivement les concepts de la couche business, applicative et infrastructure. Ces concepts sont issus de la spécification officielle d'ArchiMate. [The Open Group, 2013]

| Concept | Description | Notation |
|--------------------|---|---|
| Emplacement | Un emplacement conceptuel ou dans l'espace |   |
| Processus business | Un élément de comportement qui groupe les comportements basés sur une commande d'activités. Il est destiné à produire un ensemble défini de produits ou de services d'affaires. |   |
| Fonction business | Un élément de comportement qui groupe les comportement basés sur un ensemble de critères choisis (requièrent typiquement des ressources business et/ou compétences) |   |

Continue à la page suivante

TABLE 3.1 – Suite du tableau de la page précédente

| Concept | Description | Notation |
|----------------------|---|---|
| Interaction business | Un élément de comportement qui décrit le comportement d'une collaboration business |  |
| Événement business | Quelque chose qui se passe et qui influence le comportement |  |
| Service business | Un service qui remplit un besoin business pour un client |  |
| Objet business | Un élément passif qui est pertinent d'un point de vue commercial |  |
| Représentation | Une forme perceptible d'information supportée par un objet business |  |
| Signification | La connaissance ou l'expertise présente dans un objet métier ou sa représentation, étant donné un contexte particulier. |  |
| Valeur | La valeur relative, l'utilité ou l'importance d'un service de l'entreprise ou d'un produit. |  |

Continue à la page suivante

TABLE 3.1 – Suite du tableau de la page précédente

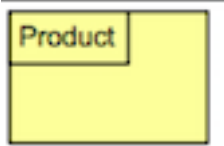
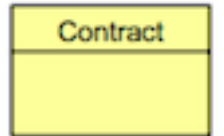

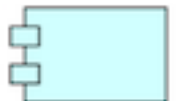
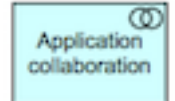





| Concept | Description | Notation |
|---------|--|---|
| Produit | Une collection cohérente de services, accompagnée par un contrat / série d'accords, qui est offert dans son ensemble à des clients (internes ou externes). |  |
| Contrat | Une spécification formelle ou informelle d'accord qui précise les droits et obligations liés à un produit. |  |

TABLE 3.1: Concepts de la couche business

| Concept | Description | Notation |
|-----------------------------|--|---|
| Composant d'application | Une partie modulaire, déployable, et remplaçable d'un système logiciel qui encapsule son comportement et des données. |   |
| Collaboration d'application | Un ensemble de deux ou plusieurs composants d'application qui travaillent ensemble pour réaliser un comportement collectif. |   |
| Interface d'application | Un point d'accès où un service d'application est mis à la disposition d'un utilisateur ou d'un autre composant de l'application. |   |
| Fonction d'application | Un élément de comportement qui groupe les comportements automatisés |   |

Continue à la page suivante

TABLE 3.2 – Suite du tableau de la page précédente

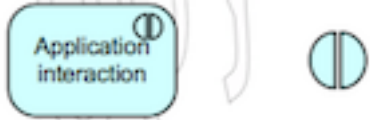
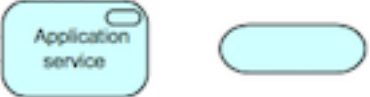
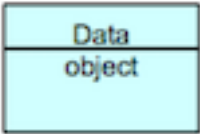



| Concept | Description | Notation |
|---------------------------|---|---|
| Interaction d'application | Un élément de comportement qui décrit le comportement d'une collaboration d'applications. |  |
| Service d'application | Un service qui expose le comportement |  |
| Objet de donnée | Un élément passif adapté pour les processus automatisés |  |

TABLE 3.2: Concepts de la couche applicative

| Concept | Description | Notation |
|----------|--|---|
| Noeud | Une ressource de calcul sur laquelle des artefacts peuvent être stockés ou déployés pour l'exécution. |  |
| Appareil | Une ressource matérielle sur laquelle des artefacts peuvent être stockés ou déployés pour l'exécution. |  |
| Réseau | Un medium de communication entre deux ou plusieurs d'appareils |  |

Continue à la page suivante

TABLE 3.3 – Suite du tableau de la page précédente

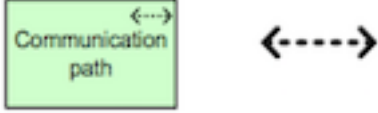
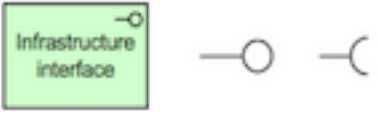
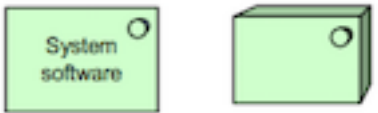
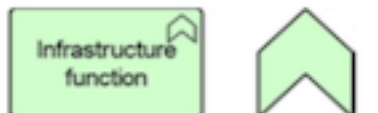

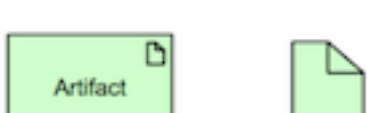
| Concept | Description | Notation |
|----------------------------|---|---|
| Chemin de communication | Un lien entre deux ou plusieurs noeuds, à travers lequel les noeuds échangent des données |  |
| Interface d'infrastructure | Un point d'accès où les services d'infrastructure offerts par un nœud peuvent être consultés par d'autres nœuds et composants de l'application. |  |
| Logiciel système | Un environnement logiciel. |  |
| Fonction d'infrastructure | Un élément de comportement qui peut être effectué par un noeud |  |
| Service d'infrastructure | Une unité fonctionnelle visible, fournie par un ou plusieurs noeuds. |  |
| Artéfact | Un élément physique de données qui est utilisé ou produit dans un processus de développement de logiciels, ou par le déploiement et le fonctionnement d'un système. |  |

TABLE 3.3: Concepts de la couche infrastructure

3.2.2.3 Que retenir dans le cas de notre problématique

ArchiMate nous sera utile pour modéliser la virtualisation au sein d'un data center. Il permettra de mettre à la lumière la complexité à laquelle il faut faire face lorsque l'on veut évaluer l'impact CO₂ d'un service hébergé. Nous utiliserons bien entendu l'infrastructure

technique. Grâce à celle-ci, nous pourrions représenter l'infrastructure technique et plus particulièrement les serveurs. De plus, nous utiliserons aussi le concept d'application vu qu'un service d'une entreprise est souvent décomposé en différentes applications. Enfin, nous aurons besoin aussi des produits et services vu que l'on s'intéresse à la problématique du reporting de CO₂ qu'émet un service offert par un acteur externe.

3.2.3 La virtualisation avec ArchiMate

La virtualisation dans ArchiMate n'est pas intégrée de façon officielle mais plusieurs sources sur internet [BiZZdesign,] permettent de l'intégrer. Cette intégration est nécessaire dans le cadre de ce mémoire car les data centers utilisent la technologie de virtualisation dans les serveurs.

ArchiMate permet de modéliser tous les éléments du problème que nous voulons traiter : les services (qui peuvent utiliser plusieurs logiciels), la virtualisation et les infrastructures physiques. Dans un premier temps, nous montrerons une architecture sans virtualisation (Figure 3.3) et ensuite, nous ferons cette même architecture en incluant la virtualisation (Figure 3.4) comme si l'application était déployée dans un serveur virtualisé.

Dans la Figure 3.3, on retrouve une machine physique sur laquelle est installé un système d'exploitation (OS) sur lequel on installe un ou plusieurs logiciels qui ont chacun une ou plusieurs fonctionnalités ou rôles qui rendent des services. Dans cette configuration, on peut remarquer aisément que le problème d'identification des ressources allouées est possible. En effet, le serveur n'est pas partagé par plusieurs acteurs business. Chacun possède son propre serveur.

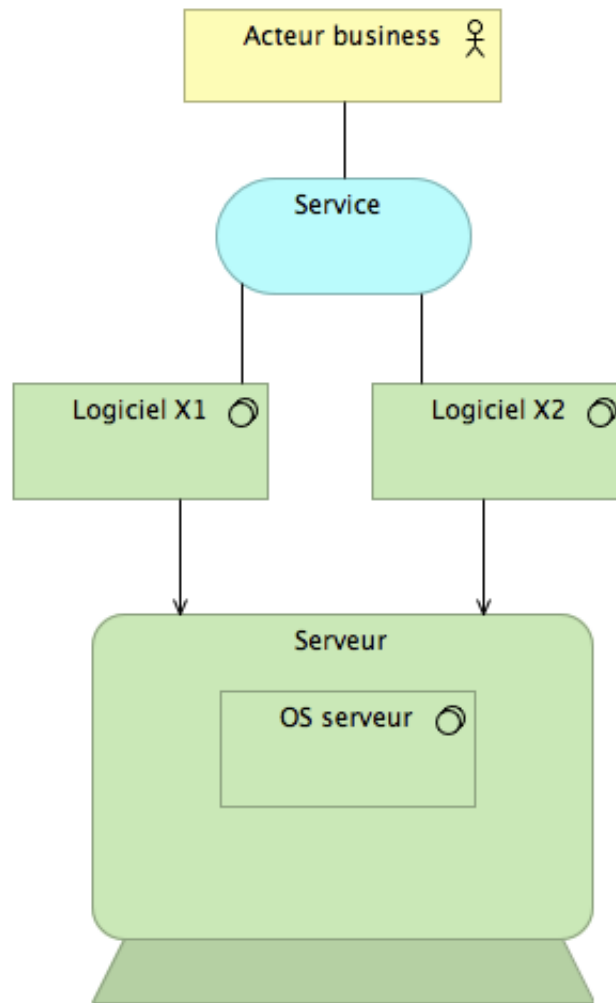


FIGURE 3.3 – Architecture typique sans virtualisation

La Figure 3.4 permet de mettre à la lumière toute la complexité d’une architecture basée sur la virtualisation dans le cas du problème d’assignation de ressources utilisées par un service. Le logiciel de virtualisation (hyperviseur) va créer des noeuds virtuels en fonction des services présents dans le serveur. De plus, en cours de journée et grâce à la flexibilité de la virtualisation, un logiciel peut migrer d’une ressource physique vers une autre. Il faudra donc bien identifier la décomposition d’un service en ressources logicielles et suivre sa trace afin de savoir sur quelle ressource physique elle est déployée.

Le logiciel de virtualisation (par exemple VMware) permettra de voir la pourcentage de CPU consommé par chaque machine virtuel.

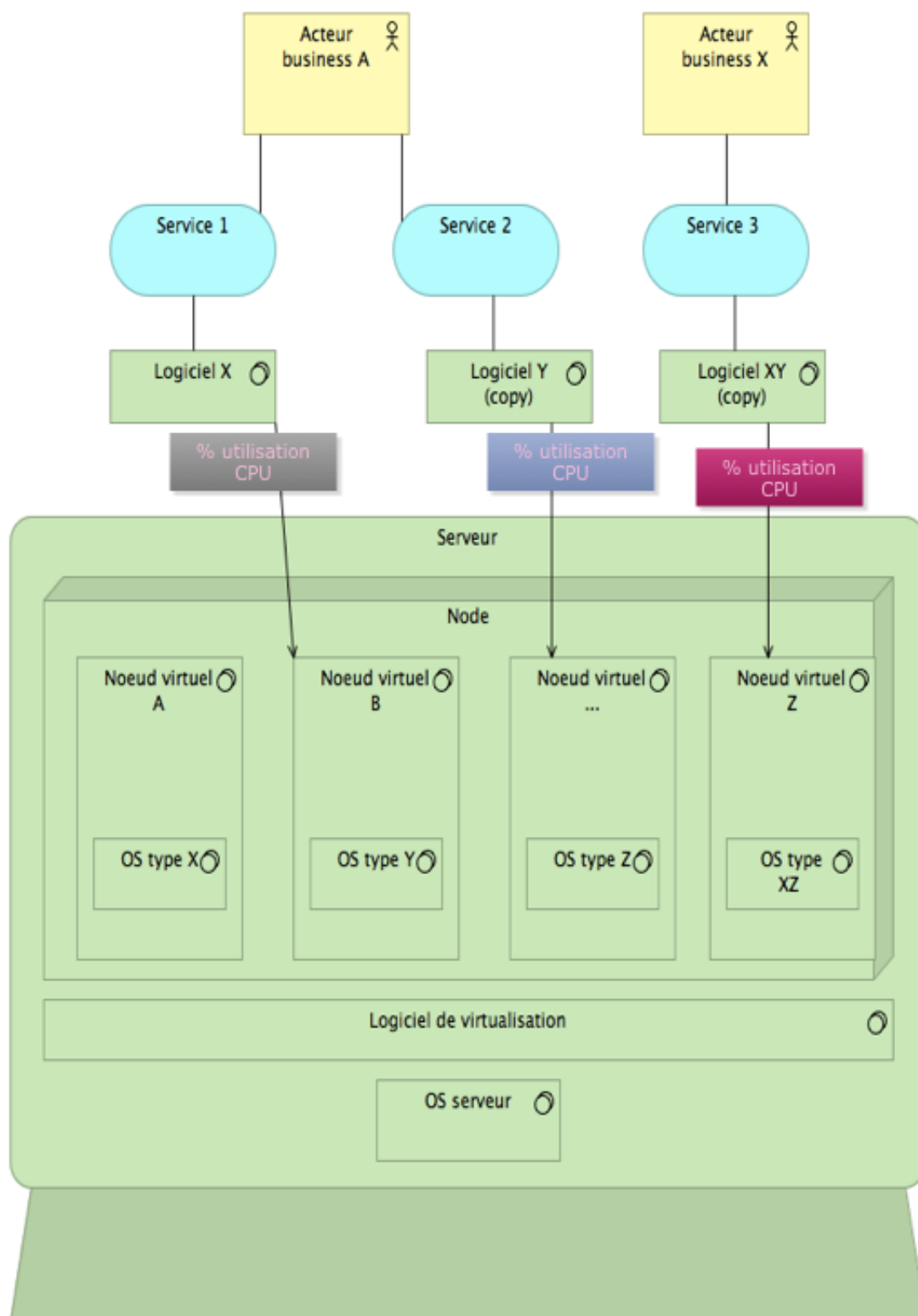


FIGURE 3.4 – Architecture typique avec virtualisation

Chapitre 4

Méthodes de mesure de CO₂

Il n'existe pas de standard international pour la réalisation d'un bilan de gaz à effet de serre. Malgré tout, des cadres méthodologiques ont été créés afin de répondre à ce besoin. On peut citer parmi ceux-ci : GHG Protocol, ADEME et CIGREF, Bilan Carbone, etc. De telles méthodes sont nécessaires aux entreprises afin de procéder à une évaluation des GES que ce soit au niveau de leur business ou de leur IT. Les principaux buts de ce type d'évaluations sont :

- Comprendre les émissions à travers le cycle de vie du produit et où se trouve la majorité des émissions dans le cycle de vie. Cela peut aider à orienter les efforts pour réduire les émissions du produit, telles que :
 - ☐ La réduction des émissions grâce au changement dans le design d'un produit ;
 - ☐ La réduction des émissions grâce au changement dans la fabrication d'un bien ou la fourniture d'un service ;
 - ☐ La réduction des émissions dans les étapes d'utilisation du produit.
- Suivre les changements au fil du temps, surveiller l'impact des améliorations de produits et des nouvelles versions du produit ;
- Répondre aux questions des clients sur les émissions de GES du produit ;
- Faire rapport des émissions de CO₂ d'un produit ;
- Se préparer à des réglementations futures (e.g. EU qui annonce sa réduction de 40% [Commission Européenne, 2014], ...).

Dans la suite de ce chapitre, nous aborderons les éléments d'un bilan carbone, le fonctionnement de service dématérialisé pour le reporting de CO₂ dans les data centers, les différents cadres méthodologiques et enfin un regard critique de ceux-ci. Il faut noter que lorsque nous présenterons les différents cadres méthodologiques, certains seront des cadres globaux, c'est-à-dire qu'il peuvent s'appliquer à n'importe quel produit (Carbon Trust), tandis que d'autres seront spécialement étudiés dans le cadre IT (ADEME et CIGREF, ITU-T) et des data centers (GHG Protocol).

4.1 Eléments des bilans carbone

4.1.1 Les différentes normes en matière de bilan carbone

1. ISO 14064-1 [ISO, 2006]
 - Spécifie les principes et les exigences, au niveau des organismes, pour la quantification et la rédaction de rapports sur les émissions de gaz à effet de serre (GES) et leur suppression. Elle comprend des exigences pour la conception, la mise au point, la gestion, la rédaction de rapports et la vérification de l'inventaire des GES d'un organisme.
2. ISO 14069 [ISO, 2013]
 - Décrit les principes, les concepts et les méthodes se rapportant à la quantification et à la déclaration des émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre (GES) par une organisation. Il fournit des directives d'application de l'ISO 14064-1 aux inventaires des gaz à effet de serre, au niveau des organisations, pour la quantification et la déclaration des émissions directes, des émissions indirectes liées à l'énergie et des autres émissions indirectes.
3. GHG Protocol complet [GHG Protocol, 2012a]
 - Présente les normes et lignes directrices de comptabilisation et déclaration à l'intention des compagnies et autres types d'organisations. Elle aborde la question de la comptabilisation et de la déclaration des six gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote et trois substituts des chlorofluorocarbones) couverts par le Protocole de Kyoto
4. Bilan Carbone [Wikipedia, 2006]
 - Le bilan carbone d'un produit ou d'une entité humaine (individu, groupe, collectivité, etc.) est un outil de comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre, devant tenir compte de l'énergie primaire et de l'énergie finale des produits et services.

4.1.2 Périmètre organisationnel

La norme ISO 14064-1 , prévoit que la réalisation d'un bilan GES d'une organisation nécessite de définir le périmètre organisationnel, concrètement, de définir les installations ou les sites concernées par l'évaluation. En effet, l'organisation peut détenir, contrôler ou être impliquée dans les activités de différentes installations. Toute installation peut comporter une ou plusieurs sources de GES. Dans notre cas, le périmètre organisationnel sera les installations du data center présentes sur le site.

La sélection du périmètre d'étude dépend du but recherché dans la réalisation du bilan GES. Cependant, d'un point de vue normatif, l'ISO 14064-1 définit 2 modes de consolidation :

- L'approche « part de capital » : l'organisation consolide les émissions des installations à hauteur de sa prise de participation dans ces dernières
- L'approche « contrôle » :

- Financier : l'organisation consolide 100% des émissions des installations pour lesquelles elle exerce un contrôle financier
- Opérationnel : l'organisation consolide 100% des émissions des installations pour lesquelles elle exerce un contrôle opérationnel

4.1.3 Périmètre opérationnel

Le périmètre opérationnel correspond aux activités du périmètre organisationnel. Il faut donc identifier quelles activités de l'organisation sont responsables des GES. L'approche la plus largement acceptée est d'identifier et de catégoriser les émissions en trois groupes (connu sous le nom scopes). Les trois scopes (Figure 4.1) sont :

- **Scope 1 (émissions directes)** : émissions directes provenant des installations fixes ou mobiles situées à l'intérieur du périmètre organisationnel (détenues ou contrôlées par l'organisme ;
- **Scope 2 (énergie indirecte)** : émissions indirectes associées à la production d'électricité, de chaleur ou de vapeur importée pour les activités de l'organisation ;
- **Scope 3 (autres sources indirectes)** : les autres émissions indirectement produites par les activités de l'organisation qui ne sont pas comptabilisées au scope 2.

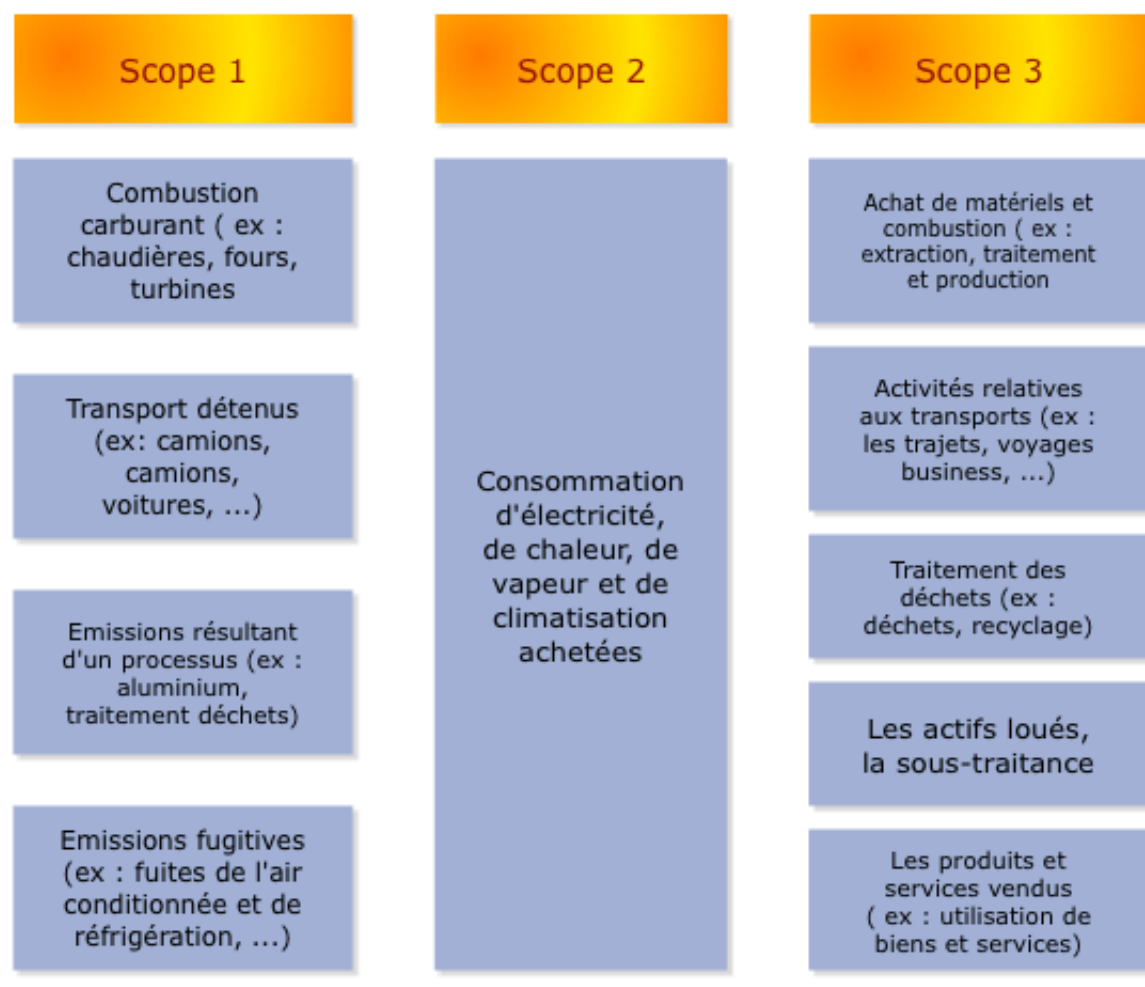


FIGURE 4.1 – Eléments présents dans les scope 1, 2 et 3

4.1.4 Les postes d'émissions liés aux différents scopes

Les 24 postes d'émissions proposés par l'ISO 14069 intègrent d'une manière ou d'une autre, l'ensemble des émissions et détaillent de manière plus précise les émissions indirectes (17 postes différents parmi les 24).

| Type d'émissions | N° et poste d'émissions |
|--|--|
| Emissions directes de GES (Scope 1) | 1. Emissions directes des sources fixes de combustion 2. Emissions directes des sources mobiles à moteur thermique 3. Emissions directes des procédés hors énergie 4. Emissions directes fugitives 5. Emissions issues de la biomasse (sols et forêts) |
| Emissions de GES à énergie indirecte (SCOPE 2) | 6. Emissions indirectes liées à la consommation d'électricité 7. Emissions indirectes liées à la consommation de vapeur, chaleur ou froid |
| Autres émissions indirecte de GES (SCOPE 3) | 8. Emissions liées à l'énergie non incluse dans les catégories « émissions directes de GES » et « émissions de GES à énergie indirectes » 9. Achats de produits ou services 10. Immobilisation de biens 11. Déchets 12. Transport de marchandises amont 13. Déplacements professionnels 14. Franchise amont 15. Actifs en leasing amont 16. Investissement 17. Transport des visiteurs et des clients 18. Transport des marchandises aval 19. Utilisation des produits vendus 20. Fin de vie des produits vendus 21. Franchise aval 22. Leasing aval 23. Déplacement domicile travail |
| | 24. Autres émissions |

TABLE 4.1 – Les différents postes d'émissions relatifs aux scopes

4.2 Fonctionnement des services dématérialisés

Pour bien comprendre les postes d'émissions liés aux activités TIC, il convient de comprendre, au moins de manière synthétique, le mode de fonctionnement de tout service dématérialisé informatique ou télécom (abonnement téléphonique, application Internet, logiciel informatique, etc.). En effet, les services informatiques et télécoms, pour pouvoir exister et être utilisés dans une organisation, nécessitent un ensemble de moyens et de flux physiques qui ont une influence sur les émissions de GES.

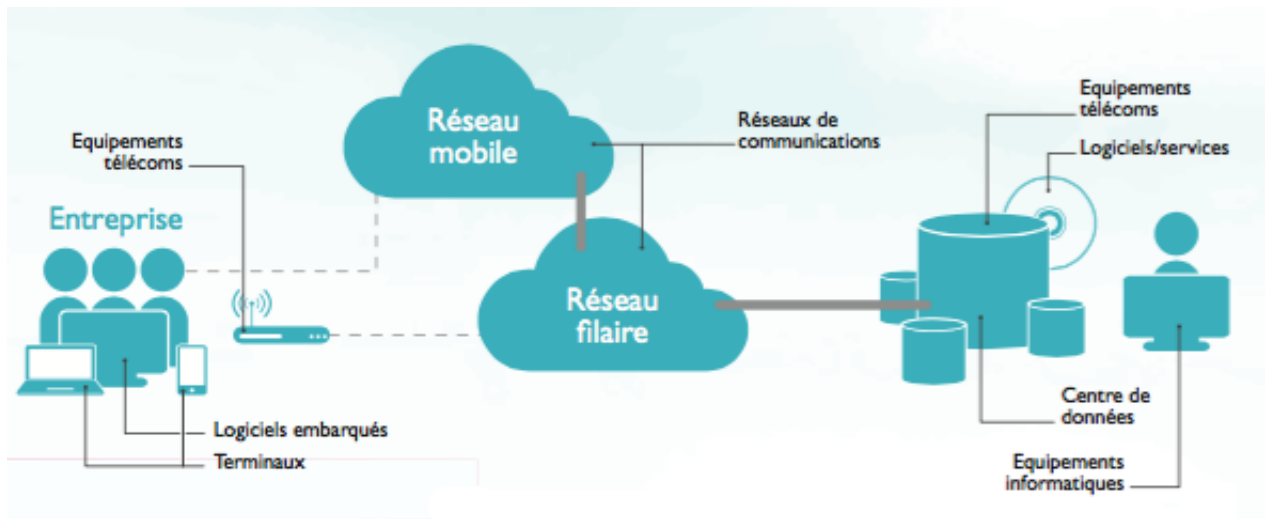


FIGURE 4.2 – Analyse d’impact des activités TNIC

Cette analyse des maillons génériques des services TIC a simplement pour objectif de mieux appréhender les différents postes d’émissions (présentés à la section 4.1.4) potentiels relatifs à ce type de service. Nous allons passer en revue ce mode de fonctionnement décrit par ADEME et CIGREF [Ademe et Cigref , 2012].

4.2.1 Terminaux des clients

Rôle :

Pour utiliser un service informatique ou télécom, un utilisateur a besoin d’un terminal. Celui-ci recouvre plusieurs réalités : ordinateur du type poste fixe, ordinateur portable, téléphone mobile, smartphones, terminal type client léger, etc.

En fonction de la complexité du terminal, il peut être mono-service (téléphones mobiles non smartphone) ou au contraire multi-services, ce qui est la tendance actuelle permettant soit à partir de smartphone soit à partir d’ordinateurs portables de disposer de services aussi bien de communication (voix, vidéo, etc.) que d’accès à des applications dites data (accès internet, etc.).

| | |
|--|---|
| Activités induites par les terminaux des clients | Poste d'émission |
| La conception et la fabrication des terminaux | Poste 9 « Achats de produits ou services » |
| Le transport et la diffusion sur le lieu d'utilisation | Poste 12 « Transport de marchandises en amont » Poste 18 « Transport de marchandises aval » |
| Leur utilisation nécessite de la consommation énergétique | Poste 6 « Emissions indirectes liées à la consommation d'électricité », Poste 10 « Immobilisation de biens » Poste 19 « Utilisation des produits vendus » |
| Leur utilisation nécessite des activités de maintenance, d'assistance, voire de réparation dans certains cas | Poste 9 « Achats de produits ou services » |
| Leur fin de vie nécessite la mise en œuvre d'une filière de traitement des déchets | Poste 20 « Fin de vie des produits vendus » |

TABLE 4.2 – Postes d'émissions des terminaux des clients

4.2.2 Périphériques

Rôle :

Les périphériques de type imprimante sont classiquement identifiés comme du matériel TNIC même si leur objectif principal reste de produire du papier.

| | |
|--|--|
| Activités induites par les périphériques | Poste d'émission |
| Les périphériques induisent les mêmes activités que les terminaux clients présentés précédemment avec un impact important sur l'utilisation de consommables (papier, toners d'impressions, etc.) | Poste 6 « Emissions indirectes liées à la consommation d'électricité » Poste 9 « Achats de produits ou services » |

TABLE 4.3 – Postes d'émissions des périphériques

4.2.3 Logiciels clients ou logiciels embarqués

Rôle :

Un terminal client ne sert à rien sans des logiciels permettant de faire fonctionner celui-ci et permettant, soit à l'utilisateur de travail en local (tableur, traitement de texte, etc.), soit de lui permettre d'accéder à d'autres services externes (navigateur web, etc.)

| Activités induites par les logiciels | Poste d'émission |
|--|---|
| <p>Les logiciels qui sont mis en œuvre aujourd'hui par des sociétés spécialisées impliquent le travail de nombreux collaborateurs pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> — La conception — Le codage — Le test — La promotion — Les mises à jour et le déploiement — Le support à l'utilisation | <p>Poste 9 « Achats de produits ou services »</p> |

TABLE 4.4 – Postes d'émissions des logiciels clients ou logiciels embarqués

4.2.4 Serveurs informatiques et équipements télécoms

Rôle :

Les serveurs informatiques sont des matériels qui peuvent être, concernant leur fabrication, de conception relativement proches des terminaux clients mais souvent plus puissant et plus performant que ces derniers car leurs rôles est de faire fonctionner des logiciels et de stocker des terabytes de données pour un ensemble d'utilisateurs qui vont, de manière permanente ou temporaire, être connectés à ces systèmes afin de pouvoir profiter d'un service ou logiciel informatique..

| | |
|---|--|
| Activités induites par les serveurs et équipements télécoms | Poste d'émission |
| Les activités de conception et de fabrication de ces matériels | Poste 10 « Immobilisation de biens » |
| Le transport et la diffusion sur le lieu d'utilisation | Poste 12 « Transport de marchandises en amont » Poste 18 « Transport de marchandises aval » |
| Le fonctionnement de ces équipements nécessite la fourniture d'une énergie électrique continue (sans rupture) et provoque des dégagements de chaleur qui rendent nécessaire la mise en œuvre de systèmes de climatisation spécifiques qui, eux aussi, consomment de l'énergie électrique. | Poste 4 « Emissions directes fugitives » Poste 6 « Emissions indirectes liées à la consommation d'électricité » |
| Leur utilisation nécessite des activités de maintenance, d'assistance, voire de réparation dans certains cas | Poste 9 « Achats de produits ou services » |
| Leur fin de vie nécessite la mise en œuvre d'une filière de traitement des déchets | Poste 11 « Transport et traitement des déchets de l'organisation » |

TABLE 4.5 – Postes d'émissions des serveurs informatiques et équipements télécoms

4.2.5 Logiciels applicatifs

Rôle :

Les logiciels applicatifs qui fonctionnent sur les environnements serveurs ont le même rôle que les logiciels clients ou embarqués, à la différence qu'ils apportent un service de calcul, de stockage de données ou de communication à plusieurs utilisateurs de manière simultanée.

| Activités induites par les logiciels applicatifs | Poste d'émission |
|---|--|
| <p>A l'instar des logiciels clients, les logiciels ou systèmes serveurs impliquent le travail de nombreux collaborateurs pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> — La conception — Le codage — Le test — La promotion — Les mises à jour et le déploiement — Le support à l'utilisation | Poste 9 « Achats de produits ou services » |

TABLE 4.6 – Postes d'émissions des logiciels applicatifs

4.2.6 Réseaux de communications

Rôle :

Pour qu'un utilisateur accède à un service de type TNIC, il faut qu'un lien de communication existe entre lui et les infrastructures d'hébergement. Il peut s'agir d'un lien :

- Local (Local Area Network) : il accède alors à une ressource (le service TNIC) qui est géographiquement proche de lui ; sur le même site ou sur un site relié de manière spécifique et privé ;
- Distant (Wide Area Network) : il accède alors via l'infrastructure d'un opérateur télécom à une ressource distante de sa localisation ; elle peut être située à plusieurs milliers de km de sa localisation (ex : Facebook, Google, etc.).

Les technologies d'interconnexion sont variables. Il peut s'agir de connexions basées sur :

- Des liens dits filaires (câbles, etc.) assurant le raccordement aussi bien de continent, que de pays, de villes, etc ;
- Des liens « sans fil » ce qui est notamment le cas dans les réseaux de téléphonie mobile ;
- Par exception des liens satellitaires peuvent être mis en place sur des sites inaccessibles avec les autres moyens cités.

| Activités induites | Poste d'émission |
|---|--|
| Les services réseaux nécessitent le fonctionnement d'équipements informatiques et télécoms qui, à l'instar des serveurs informatiques, consomment de l'énergie et ont nécessité de l'énergie pour leur fabrication et transport sur le lieu d'utilisation | Poste 6 « Emissions indirectes liées à la consommation d'électricité » Poste 10 « Immobilisation de biens » Poste 19 « Utilisation des produits vendus » |
| Des activités humaines sont nécessaires pour l'installation, le paramétrage, le maintien en conditions de fonctionnement, à la fois des infrastructures coeur de réseau et des infrastructures localisées chez les clients | Poste 9 « Achats de produits ou services » |

TABLE 4.7 – Postes d'émissions des réseaux de communication

4.2.7 Infrastructures d'hébergement physiques des équipements

Rôle :

Les infrastructures informatiques et télécoms sont, de par leurs conditions de fonctionnement (sensibilité à l'humidité, continuité de l'alimentation électrique, température maximale de fonctionnement, etc.) le plus souvent hébergées dans des data centers qui sont des bâtiments physiques (ou des parties de bâtiments) dédiés à cette fonction.

| Activités induites | Poste d'émission |
|--|--|
| Un centre de données est un bâtiment, il a donc impliqué des activités de construction | Poste 10 « Immobilisation de biens » |
| Un centre de données met en œuvre toute une infrastructure pour offrir une continuité électrique (onduleurs, etc.), une fourniture de froid (climatisation, consommation d'eau, etc.), ainsi qu'une redondance de ces éléments en cas de panne | Poste 1 « Emissions directes des sources fixes de combustion » Poste 4 « Emissions directes fugitives » Poste 10 « Immobilisation de biens » |
| Un centre de données centralise aussi des activités humaines liées à sa maintenance et à son fonctionnement. | Poste 9 « Achats de produits ou services » |

TABLE 4.8 – Postes d'émissions des infrastructures d'hébergement physiques des équipements

4.3 Carbon Trust

Le Carbon Trust donne une démarche à suivre afin d'effectuer une évaluation CO₂ dans n'importe quel secteur. Nous allons donc étudier comment Carbon Trust en passant en revue les étapes.

4.3.1 L'empreinte carbone

"L'empreinte carbone d'une entreprise est le total des émissions de GES causées directement et indirectement par un individu, une organisation, un produit et qui est exprimé en équivalent dioxyde de carbone (eCO₂)". Il existe différents types d'empreintes carbone :

- L'empreinte carbone organisationnel : ce sont toutes les émissions de GES de l'organisation qui incluent l'énergie du bâtiment, le processus industriel et les véhicules de société.
- L'empreinte carbone produit : mesure l'ensemble des émissions de GES du cycle de vie d'un produit allant de l'extraction des matières premières, de la production et du recyclage.

Comment on peut le voir dans la Figure 4.3, l'empreinte carbone organisationnel est un sous-ensemble de l'empreinte carbone produit qui reprend toutes les phases du cycle de vie.

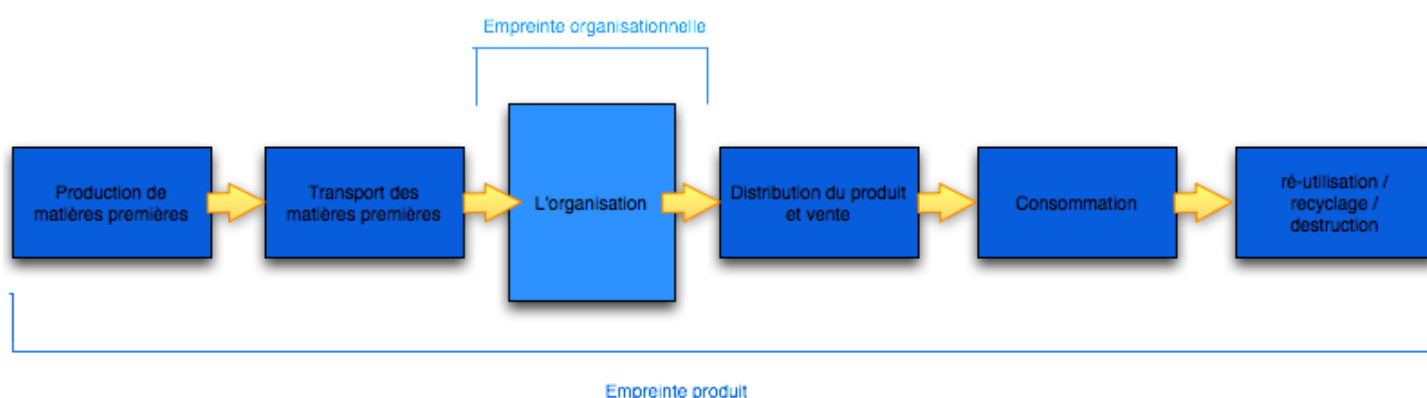


FIGURE 4.3 – Les différentes sortes d’empreintes carbone

4.3.2 Etapes de la méthode Carbon Trust

1. Décider la méthode à suivre

Lorsque l’on fait une telle évaluation, il faut choisir une méthode et s’y tenir afin de rester consistant tout au long de l’évaluation. En effet, il existe plusieurs normes telles que le GHG Protocol, ISO 14064.

2. Définir les limites/frontières organisationnelles et opérationnelles

Il faut délimiter quelles parties de l’organisation vont être incluses dans l’évaluation.

3. Collecter les données

La finesse des résultats finaux viendra de la qualité et la quantité de données que l’organisation reçoit. Il faut bien sûr collecter un maximum de données en rapport avec les limites organisationnelles et opérationnelles qui ont été décidées.

4. Appliquer les facteurs d’émissions

L’empreinte carbone est mesurée en tonnes équivalent CO₂ et est calculée en utilisant les données collectées multipliées par les facteurs d’émissions standards.

5. Vérifier les résultats

Vérifier les résultats permettra de rendre les chiffres produits plus crédibles au yeux des personnes extérieures.

4.4 ADEME et CIGREF

La méthode proposée par ADEME et CIGREF s’apparente plutôt à un guide comme on peut lire sur leur site internet. Ce guide a été rédigé grâce à plusieurs groupes de travaux en rapport avec un thème particulier :

- Le Groupe Datacenter : a étudié le périmètre des centres de données incluant les salles informatiques et les espaces techniques d'une organisation. Il a rassemblé des professionnels du secteur (hébergeurs, exploitants, responsables de salle, etc.)
- Le Groupe réseaux et télécoms : a étudié le périmètre de l'ensemble des infrastructures et des équipements nécessaires pour la connexion ou l'interconnexion d'un site ou d'un collaborateur de l'organisation. Il a rassemblé les principaux opérateurs fournisseurs de solutions télécoms fixes, mobiles, en France ou à l'international, sur des réseaux historiques ou IP ;
- Le Groupe environnement de travail et utilisateur : a étudié le périmètre comprenant les équipements (desktops, laptops, etc.) et consommables d'impression (encres, papiers, etc.) ainsi que les services associés (maintenance, déploiement, etc.) des entreprises ;
- Le Groupe organisation et pilotage : en complémentarité avec les trois autres groupes de réflexion, le groupe a travaillé sur les indicateurs de suivi de la politique CO₂ des organisations, les impacts organisationnels associés, et réfléchi sur l'engagement sociale de la DSI.

4.4.1 Etapes de la méthode ADEME et CIGREF



FIGURE 4.4 – Organisation d'un bilan de GES selon ADEME [Ademe et Cigref , 2012]

4.4.1.1 Pré-requis

Identifier les parties prenantes

Le bilan GES du secteur des TIC ne concerne pas seulement les informaticiens. Il y a une multitude d'autres acteurs comme :

- Le service qui gère le bâtiment et les installations ;
- Les principaux fournisseurs de prestations de services, de logiciels et de matériels ;
- La direction financière et des achats ;
- etc.

Impliquer les parties dirigeantes

Pour être efficace et prendre tout son sens, la démarche de bilan GES doit être intégrée dans une stratégie, plus globale, de développement durable de l'organisation, elle doit faire partie d'un tout cohérent. C'est pour cela que le projet doit avoir le soutien de la direction

générale afin que le taux de réussite augmente.

Enclencher une démarche d'amélioration continue

La réalisation d'un bilan GES doit s'inscrire dans une démarche stratégique d'optimisation des activités TNIC avec la volonté de construire un plan d'amélioration dans la durée. C'est une logique d'amélioration continue. La réalisation d'un bilan de GES ne doit pas se limiter à « sortir un chiffre ».

4.4.1.2 Cadrage

Préciser le périmètre d'analyse

Il est recommandé selon le guide de prendre en compte les 3 scopes tel que défini à les Section 4.1.2.

Préparer la collecte d'information

La préparation de la collecte des informations nécessite de réfléchir sur plusieurs aspects :

- **La nature des données à collecter ;**
- **Les moyens de collecte et les acteurs (internes ou externes) ;**
- **La finesse des résultats attendus.**

La notion de collecte intègre plusieurs approches :

- La mesure proprement dite ou la récupération d'informations de consommation.
- L'évaluation de dispositifs sur lesquels aucune information directe n'est disponible : ce sera notamment le cas des équipements bureautiques (ordinateurs, écrans, imprimantes, etc.) auxquels aucun compteur électrique n'est généralement associé pour avoir une mesure directe.

Dans ce dernier cas, plusieurs stratégies peuvent être adoptées :

- La mise en place de logiciels spécialisés pour collecter l'information par poste de travail. Notons que ces logiciels permettent généralement de récupérer le comportement des utilisateurs (temps de veille, etc.) ce qui peut fiabiliser et faciliter la récupération des informations. En revanche, ils se basent sur une estimation de la consommation électrique de l'équipement.
- La classification des équipements selon leurs caractéristiques techniques (puissance, marque, disque, taille écran, etc.) et leur utilisation afin de procéder à des benchmarks unitaires par type de configuration, à l'aide de wattmètres, permet ensuite d'extrapoler la consommation globale.

4.4.1.3 Collecte de données

La collecte de données doit prioritairement s'attacher à récupérer des données primaires (Tableau 4.9) qui constitueront le moyen de construire un bilan GES le plus fiable, ou le moins imprécis, possible. Les données secondaires, extrapolées, approchées 4.9 n'ont pour but que de permettre l'évaluation des émissions de CO₂ pour lesquels l'organisation n'a pas d'informations primaires.

| Type de données | Description |
|---------------------|--|
| Données primaires | Données observées, prélevées à partir des systèmes d'information et relevés physiques appartenant ou exploités par la personne morale ou une société dans sa chaîne d'approvisionnement. |
| Données secondaires | Données génériques ou données moyennes provenant de sources publiées, qui sont représentatives des activités d'une entreprise ou de ses produits. Ex : « Consommation en litre moyen par an de fioul par m2 en informatique. ». |
| Données extrapolées | Données primaires ou secondaires liées à une activité similaire qui sont adaptées ou personnalisées à une nouvelle situation. Ex : « Formule d'approximation du PUE ». |
| Données approchées | Données primaires ou secondaires liées à une activité semblable qui peut être utilisée en lieu et place de données représentatives. Ces données existantes sont directement utilisées sans adaptation. Ex : « Transposition des évaluations de consommation énergétique d'une catégorie d'équipements à une autre catégorie d'équipements » |

TABLE 4.9 – Nature des données à récolter

4.4.1.4 Analyse et restitution des données

Après avoir recueilli les différentes données et mesures, il faut bien entendu les analyser. Mais en ce qui concerne cette phase, ce que l'on fait des données varie en fonction des objectifs que l'entreprise qui réalise le bilan carbone s'est fixé. En effet, l'entreprise peut utiliser ces données pour :

- Essayer de diminuer les émissions de CO₂ ;
- Faire du marketing. En effet, si l'entreprise pollue moins, certains clients qui sont sensibles à l'environnement achèteront de préférence ce produit ou prendront les services offerts par cette entreprise ;
- Avoir une vue globale de ce qui consomme le plus d'électricité ;
- etc.

4.4.1.5 Plan d'action

En fonction de l'objectif ou des objectifs que l'entreprise s'est fixée, un plan d'action adéquat sera défini.

4.4.2 Facteurs d'émissions et données génériques

En annexe A, vous trouverez des données génériques fournies par ADEME. Ces données sont en rapport avec les émissions de CO₂ des différents équipements présents dans un data center. Ce sont bien entendu des approximations et elles doivent être adaptées à chaque data center.

4.5 ITU-T : Telecommunication standardization sector of ITU

ITU-T [ITU-T, 2012] a développé une méthodologie pour aider le secteur des TIC dans la réalisation d'un bilan GES dans les organisations TIC. Cette section va décrire brièvement les étapes d'une telle méthode. Comme on pourra le remarquer, ces étapes sont assez similaires avec d'autres méthodes tel que ADEME.

4.5.1 Etapes de la méthodologie ITU-T

4.5.1.1 Frontières organisationnelles

Cette notion est assez similaire au périmètre organisationnel (Section 4.1.2). Dans leur définition des frontières organisationnelles, les organisations TIC doivent prendre en compte toutes les installations utilisées pour les opérations de l'organisation, qu'elles appartiennent à l'organisation ou qu'elles soient louées.

4.5.1.2 Frontières opérationnelles

Cette notion est assez similaire au périmètre opérationnel (Section 4.1.3). Il faut identifier quelles activités contribuent à la consommation d'énergie et les émissions GES. Il faut les catégoriser par rapport aux différents scopes

4.5.1.3 Sélectionner une méthode de quantification

Pour quantifier l'impact CO₂, il utilise la formule suivante :

$$\text{Electricité ou autre énergie consommée} \times \text{facteur d'émission spécifique CO}_2 \text{ de Grid} = \text{Kg CO}_2 \quad (4.1)$$

4.5.1.4 Collection de données

Il faut identifier les données pertinentes afin de procéder à un bilan GES. ITU-T conseille de prendre en compte les scopes 1, 2 et 3.

4.5.1.5 Mesures pour réduire les émissions de GES

Grâce au bilan réalisé, les organisations TIC peuvent identifier les activités où des optimisations d'un point de vue énergétique peuvent être faites

4.5.1.6 Evaluation annuelle

Il est conseillé de faire un bilan GES annuellement en réponse au différents buts business tels que le reporting public, le management des risques et pour s'adresser aux investisseurs mais aussi aux parties prenantes.

4.6 GHG Protocol : data center

Le GHG protocol est un des outils les plus utilisés par les entreprises voulant faire le bilan carbone de leurs activités. Il a été développé par le «World Resources Institute» (WRI) et le «World Business Council on Sustainable Development» (WBCSD) pour mesurer, gérer et déclarer les émissions de CO₂.

Dans la suite de cette section, nous allons nous intéresser à un chapitre du GHG protocol en particulier, celui sur les data centers [GHG Protocol, 2012b]. Bien entendu, il existe d'autres chapitres faisant référence à la méthode plus générale mais qui est similaire au Carbon Trust (Section 4.3) et que nous n'allons pas aborder.

4.6.1 Etapes de la méthode GHG protocol pour les data centers

4.6.1.1 Définition des frontières opérationnelles d'un data center

La frontière opérationnelle définie par le GHG protocol est défini comme :

- La génération d'électricité sur le site ;
- Alimentation sans interruption (ASI), les commutateurs, les générateurs, les unités de distribution d'énergie ;
- Le système de refroidissement ;
- Les autres composants du data center : l'éclairage, le système de surveillance ;
- Le bâtiment lui même : construction, maintenance, démolition (voir 4.6.1.3 : Calcul de l'impact du cycle de vie d'un data center) ;
- Les installations auxiliaires sur place : par exemple les bureaux, les éclairages extérieurs, etc. ;
- Les équipements informatiques : serveurs, stockages, équipements réseaux (routeurs, commutateurs, etc.) ;
- Les équipements informatiques complémentaires : écran-clavier-souris, ordinateurs, etc.

4.6.1.2 Sources d'émissions

Les sources d'émissions à prendre en compte pour les data centers sont les suivantes :

- Consommation d'énergie ;
- Combustion sur le site (ex : gaz naturel, diesel, etc.) ;
- Utilisation de réfrigérant ;
- Utilisation de matériel.

4.6.1.3 Calcul de l'impact du cycle de vie d'un data center

Le cycle de vie pour un data center est similaire à n'importe quel bâtiment commercial ou industriel. La Figure 4.5 illustre les étapes du cycle de vie qui doivent être considérées dans l'évaluation des impacts du cycle de vie d'un data center.

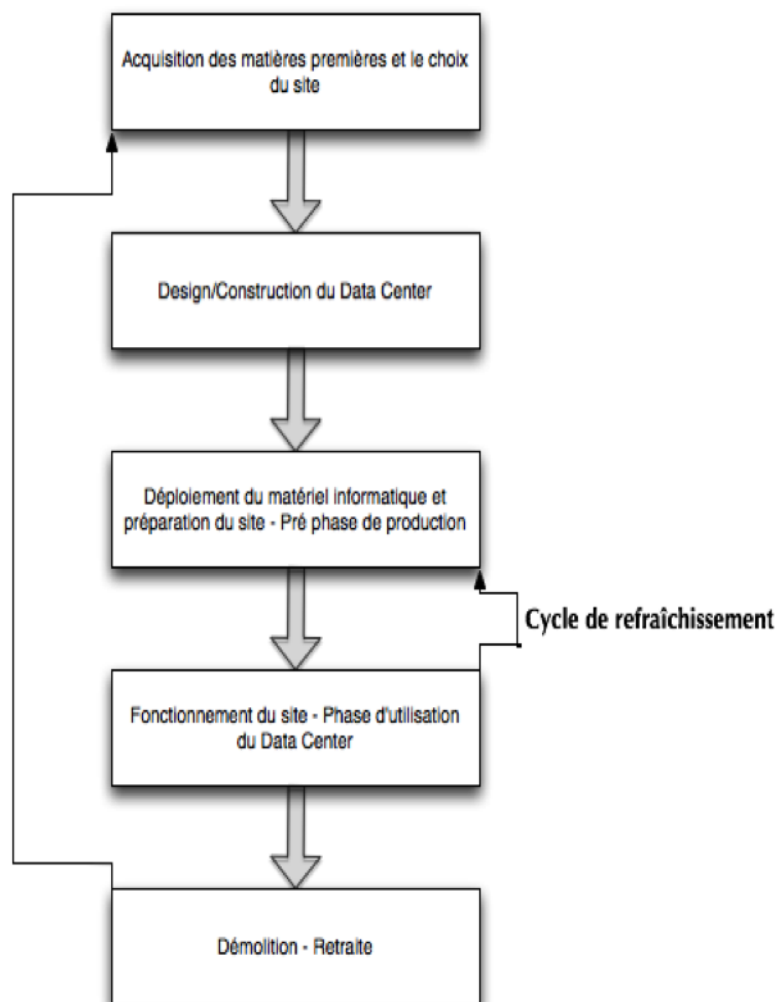


FIGURE 4.5 – Etapes du cycle de vie d'un data center [GHG Protocol, 2012b]

4.6.1.3.1 Phase de production (préparation pour l'utilisation du data center)

Les émissions qui doivent être attribuées à l'étape du cycle de vie de la production d'un data center sont :

- Les émissions associées à l'extraction des matières premières, la transformation, la fabrication et le transport des matériaux utilisés pour construire le data center, telle que définie par son périmètre opérationnel.
- Carburant / énergie utilisée au cours du processus de construction.

Pour calculer ces émissions, une liste des matériaux (BOM - Bill of Materials), avec les emplacements des matières premières et des procédés de fabrication utilisés est nécessaire.

Un inventaire des combustibles et énergie consommées lors de la construction est également nécessaire.

La liste des matériaux pour les nouveaux data centers est généralement disponible dans la documentation de construction. Cependant, cette documentation peut être difficile à obtenir pour les data centers existants qui peuvent être des vieux bâtiments acquis après la construction ou loués.

Si ces sources de données ne sont pas disponibles, des hypothèses peuvent être utilisées pour estimer la liste des matériaux basée sur :

- La taille du data center ;
- Le tier (1, 2 , 3 ou 4 ; voir Section 1.4) auquel le data center appartient ;
- La localisation.

4.6.1.3.2 Phase de déploiement des équipements IT et préparation du site

Cette étape inclut la préparation des salles du data center pour l'arrivée des équipements IT, incluant l'installation des chemins des câbles, les racks et les autres infrastructures de support.

Les émissions de l'étape de pré-production se présentent tout au long du cycle de vie du data center car il passe par des cycles de rafraîchissement (remplacement des matériaux arrivés à la fin de leur vie d'utilisation).

4.6.1.3.3 Phase d'utilisation du data center

L'énergie utilisée dans un data center comprend deux composantes qui doivent être prises en compte dans l'évaluation globale des émissions de GES d'un data center :

- Energie utilisée directement par les équipements informatiques ;
- Energie non IT utilisée pour le contrôle de l'environnement : l'énergie non IT inclut l'énergie consommée par les systèmes de refroidissements et aussi l'électricité consommée par les composants tel que les UPS, commutateurs, etc.

4.6.1.3.4 Fin de vie du data center

La fin de vie du data center doit être répertoriée dans le calcul des émissions. Le GHG Protocol recommande de se baser sur des études universitaires ou industrielles crédibles afin d'évaluer ce type d'émission.

4.7 Analyse critique

On peut remarquer que les différents standards de mesure de CO₂ ont des étapes similaires portant parfois des noms différents. Ces étapes sont importantes dans la réalisation d'un bilan carbone d'une entreprise ou d'une organisation et seront reprises dans la partie contribution de ce mémoire.

L'aspect qui nous intéresse le plus dans notre cas, c'est le bilan carbone d'une entreprise IT comme le data center. Le guide ADEME et CIGREF et le GHG Protocol relatif au data centers seront utiles. Le premier, en plus d'avoir des étapes assez similaires aux standards classiques, apporte des données génériques d'émissions de CO₂ lors de la phase de fabrication

et de fin de vie des équipements IT et non IT. Le deuxième, permet de préciser le périmètre opérationnel et organisationnel d'un data center.

Malgré tout, un aspect manque dans ces différents standards. En effet, le niveau de granularité des standards présentés concernant le bilan carbone d'un data center n'est pas assez fin. Ils n'évoquent la question suivante : comment traverser les couches architecturales qui lient un service métier à l'ensemble des ressources IT qui produisent une empreinte carbone et qui sont nécessaires pour produire ce service.

Chapitre 5

Activity Based Costing

Afin de comprendre comment utiliser la méthode ABC (Activity based costing), il est important de bien comprendre comment fonctionne cette méthode et quels sont les différents principes présents dans celle-ci. Dans un premier temps, nous définirons ce qu'est la méthode ABC. Ensuite, nous passerons en revue les différents concepts présents dans celle-ci et nous terminerons par un exemple afin de concrétiser tous ces concepts parfois abstraits.

5.1 Définition et objectifs de la méthode ABC

La méthode ABC a été créée en alternative aux méthodes de coût traditionnelles. Avec l'évolution des technologies et des procédés industriels, les unités d'oeuvres ne correspondent plus aux conditions de l'activité des entreprises. Les processus de l'entreprise sont devenus beaucoup plus complexes avec les fonctions de support telles que le marketing, la qualité, l'informatique et la logistique. C'est pourquoi la méthode ABC propose une analyse de l'entreprise en termes d'activités qui semble plus en adéquation avec l'évolution que les entreprises ont subie. Cette méthode est définie par la coopérative d'entreprises industrielles américaine CAM-I (Computer Aided Manufacturing-International) comme "A methodology that measures cost and performance of activities, resources and cost objects, assigns resources to activities and activities to cost objects based on their use, and recognizes causal relationships of cost drivers to activities". Elle permet donc de mesurer le coût et la performance des activités, des ressources et des objets de coût. Elle attribue les ressources aux activités et les activités aux objets de coût s'appuyant sur leur utilisation et reconnaît les relations de causalité entre les inducteurs de coût et les activités.

Une des conclusions tirées par le CAM-I est qu'il semble préférable de découper l'entreprise en processus et en activités plutôt qu'en fonctions ou en produits. Cette démarche repose sur le concept de chaîne de valeur de M. Porter comme le montre la Figure 5.1. Chaque activité contribue à la création de la valeur générée par l'entreprise : on distingue les activités principales, organisées en processus, et les activités de soutien, transversales au fonctionnement de l'entreprise.

La méthode ABC (Activity Based Costing) repose, en premier lieu, sur le découpage en activités pertinentes du fonctionnement de l'entreprise. Nous allons dans les sections suivantes aborder successivement, les principes de la méthode, les notions d'activités, de processus et d'inducteur sur lesquelles elle repose, les différentes démarches de calcul d'un

coût ABC, les intérêts et limites de la mise en oeuvre de la méthode.



FIGURE 5.1 – La chaîne de valeur de Porter

5.2 Principes de la méthode ABC

La méthode ABC repose sur le principe suivant : **Les activités consomment des ressources, les produits consomment des activités** comme l'illustre la Figure 5.2

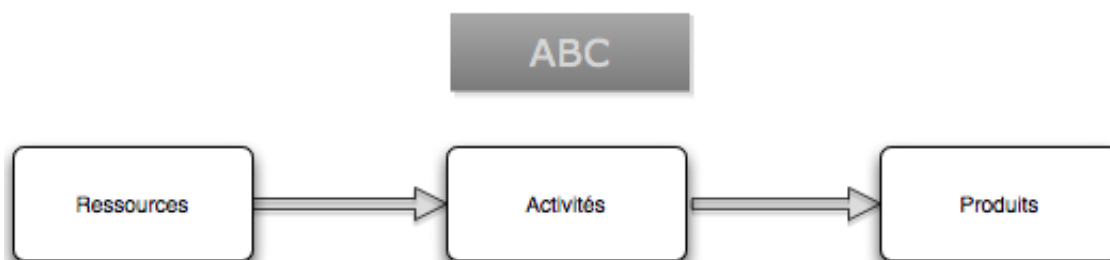


FIGURE 5.2 – Principe de la méthode ABC [Jacquot, 2007]

Le fonctionnement de l'entreprise est expliqué à l'aide d'un réseau d'activités, au bout desquelles sont obtenus les objets de coûts, c'est-à-dire les produits ou services fournis aux clients. Pour atteindre leur stade final, ces objets de coûts ont consommé des activités qui ont nécessité un certain nombre de ressources.

Dans la méthode, les ressources sont réparties entre les différentes activités au moyen des inducteurs (clés de répartition) et les activités sont imputées aux objets finaux de coûts (produits, services).

5.2.1 Notions d'activité, de processus et d'inducteurs

Activité

Une activité est définie comme suit : **“Une activité est, en général, un regroupement de tâches élémentaires.”** [Jacquot, 2007] Pour être définie, l'activité doit pouvoir être présentée à l'aide d'un verbe et d'un complément. Par exemple, «Effectuer une commande» peut intégrer différentes tâches élémentaires afin de réaliser l'objectif : étude des catalogues, informations auprès des fournisseurs, négociations téléphoniques, etc.

La méthode ABC, dont l'objectif principal est de représenter de manière fidèle le fonctionnement de l'entreprise, élargit le périmètre des causes de coûts. C'est ainsi que sont considérées comme causes de coûts les activités suivantes :

- de soutien au fonctionnement des installations (infrastructure) ;
- de soutien à la fabrication des produits (recherche et amélioration continue) ;
- en relation avec les lancements en production (entretien des lignes de production, préparation des lignes de fabrication, etc.).

Les activités de nature volumique - heures machines, jours/ouvriers, ...- sont toujours d'application mais elles ne sont plus considérées comme les uniques causes de coûts.

Processus

Un processus est défini comme suit : **“C'est un enchaînement d'activités déclenchées par une même cause et délivrant un produit, un service ou une autre information ayant de la valeur pour un client interne ou externe.”** [Jacquot, 2007]

Comme on peut s'en douter, les processus sont transversaux car ils nécessitent le plus souvent de mettre en relation plusieurs activités réalisées au sein de l'entreprise. Par exemple, si on prend le processus de traiter la commande d'un client, celui-ci va nécessiter la mise en oeuvre d'une série d'activités telles que l'approvisionnement des produits, la production, le suivi administratif, etc.

Un processus génère un ensemble de coûts dont l'analyse permet l'étude des contributions de chaque activité à la création de valeur et la mise en évidence de l'articulation entre elles.

Un produit (ou un service) est le résultat d'un processus : il résulte d'un ensemble d'activités.

Inducteur

“L'inducteur est une unité de coût permettant d'établir des liens de causalités. Il existe deux types d'inducteurs : le premier type est utilisé pour désigner une clé de répartition (inducteurs de ressources, d'activités) et le deuxième concerne la cause initiale de l'existence du coût et de son niveau (inducteur de coût : par exemple nombre de composants, nombre de références, nombre de clients, nombre de lots ou de séries, etc.).” [Jacquot, 2007]

1. L'inducteur de ressources est utilisé pour imputer les ressources - hommes, matériel et finances - entre des activités. Par exemple, le pourcentage de salaire des employés qui se consacrent à une activité déterminée.

2. L'inducteur d'activités est un facteur explicatif du niveau de l'activité. Il permet l'imputation des activités sur les produits. Par exemple : le nombre de bons de commandes détermine le niveau de l'activité «Achat».

Le calcul du coût de l'inducteur d'activité permet d'affecter le coût de celle-ci aux produits et/ou aux processus en fonction de leur consommation des activités, exprimée en nombre d'inducteurs (Formule 5.1) :

$$\text{Coût de l'inducteur} = \frac{\text{coût total de l'activité pour une période}}{\text{nombre d'inducteurs pour la période}} \quad (5.1)$$

5.3 Démarche à adopter pour la méthode ABC

Comme nous l'avons vu précédemment, la mise en place d'une méthode ABC a pour objectif d'obtenir une représentation la plus fidèle possible de la réalité que l'on veut modéliser. "Elle doit s'adapter à tous les cas de figure rencontrés, qu'il s'agisse d'un atelier de production ou du site complet de l'usine, d'un centre d'activité ou de la totalité des activités d'une division[Jacquot, 2007]."

Nous allons maintenant passer en revue les différentes étapes [Jacquot, 2007] à la mise en place de la méthode :

1. Recensement des activités, de leur production, de leurs ressources et des liens qui les unissent. Voici quelques exemples :
 - ☐ gestion des commandes reçues des clients ;
 - ☐ ordonnancement, logistique ;
 - ☐ gestion des approvisionnements auprès des fournisseurs ;
 - ☐ lancement de fabrication ;
 - ☐ production ;
 - ☐ assemblage, montage ;
 - ☐ contrôle qualité ;
 - ☐ conditionnement, emballage ;
 - ☐ expédition, livraison, service après-vente ;
 - ☐ facturation, encaissement ;
 - ☐ etc.
2. Choix des inducteurs pour chaque activité ;
3. Simplification du modèle par sélection (intégration des activités de faible importance dans d'autres activités) et concentration (regroupement d'activités qui ont le même inducteur dans des centres de regroupement) ;
4. Calcul du coût de l'inducteur d'activité (Formule 5.1) ;
5. Imputation du coût des inducteurs aux activités en fonction des volumes consommés par chacune.

5.4 Exemple d'une méthode ABC

Nous allons maintenant passer en revue l'exemple du livre de Thierry Jacquot, Richard Milkoff [Jacquot, 2007] afin de mieux comprendre les différents concepts de cette méthode. L'exemple est fait sur une société de dépannage en systèmes et matériels informatiques. Dans un souci d'une meilleure maîtrise de son fonctionnement, elle a mis en place un modèle de comptabilité de gestion à base d'activités.

Le processus «intervention sur site», qui décrit l'ensemble des activités conduisant à des interventions de maintenance, a été décomposé en cinq activités. Ces dernières ont été mises en relation avec un inducteur représentatif du fonctionnement de chacune. La valorisation de l'activité de l'inducteur a été effectuée par le contrôle de gestion.

L'intervention sur site pour le client X a donné lieu à :

- une offre de 5 produits ;
- 3 contacts préalables à la vente ;
- 5 réponses consécutives aux échanges d'informations ;
- 2 interventions sur son site, qui ont nécessité 700 € ;
- 1 facture établie.

| Index | Activité | Coût de l'activité | Inducteur d'activité | Volume de l'inducteur |
|-------|---------------------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------|
| A1 | Définir offre | 7 800 € | Produits proposés | 650 |
| A2 | Prospecter | 9 000 € | Contacts effectués | 500 |
| A3 | Vendre | 10 000 € | Réponses clients | 250 |
| A4 | Intervenir sur site | 16 400 € | Nombres d'interventions | 25 |
| A5 | Facturer | 8 640 € | Nombre de facturations | 360 |
| | Matière premières et composants | 8160 € | | |
| Total | | 60 000 € | | |

TABLE 5.1 – Activités de l'intervention sur site clients

Le Tableau 5.1 permet de déterminer le coût unitaire de chaque inducteur. Le coût de l'inducteur est obtenu en divisant celui de l'activité par le volume de son inducteur : $12 = 7800/650$.

| Index | Activité | Coût de l'activité | Inducteur d'activité | Volume de l'inducteur | Coût de l'inducteur |
|-------|---------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|
| A1 | Définir offre | 7 800 € | Produits proposés | 650 | 12 |
| A2 | Prospecter | 9 000 € | Contacts effectués | 500 | 18 |
| A3 | Vendre | 10 000 € | Réponses clients | 250 | 40 |
| A4 | Intervenir sur site | 16 400 € | Nombres d'interventions | 25 | 656 |
| A5 | Facturer | 8 640 € | Nombre de facturations | 360 | 24 |

TABLE 5.2 – Activités de l'intervention sur site clients

Le montant de la facture à faire parvenir au client X dépend du montant des activités à lui imputer et des matières premières et composants consommés lors des interventions sur site.

| Index | Activité | Inducteur d'activité | Coût de l'inducteur | Volume imputable | Coût de l'activité pour le client X |
|-------|---------------------|-------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------------|
| A1 | Définir offre | Produits proposés | 12 | 5 | 60 € |
| A2 | Prospecter | Contacts effectués | 18 | 3 | 54 € |
| A3 | Vendre | Réponses clients | 40 | 5 | 200 € |
| A4 | Intervenir sur site | Nombres d'interventions | 656 | 2 | 1312 € |
| A5 | Facturer | Nombre de facturations | 24 | 1 | 24 € |

TABLE 5.3 – Activités de l'intervention sur site clients

5.5 Analyse des points forts et faibles de la méthode

Dans le Tableau 5.4, nous allons lister une série d'avantages et d'inconvénients pour une entreprise voulant mettre une telle méthode en place

| Points forts | Points faibles |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Précision, aide à la décision ; 2. Analyse plus fine de la rentabilité et de son origine ; 3. Approche pragmatique de la composition des coûts ; 4. Meilleure interprétation des coûts de revient ; 5. Meilleure analyse des sources de profit réel de l'entreprise ; 6. Prise de décision rapide et claire sur le développement ou l'arrêt d'une activité. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Lourd et difficile à mettre en oeuvre (choix des activités, choix des inducteurs, etc.) ; 2. Collecte d'informations difficile ; 3. Hors d'usage dans la plupart des entreprises qui n'ont pas une structure de gestion rodée et une culture de gestion bien établie ; 4. Ajoute des frais importants : réorganisation de la gestion, logiciels spéciaux, équipements de cueillette et traitement des données. |

TABLE 5.4 – Points forts et points faibles de la méthode ABC

Deuxième partie

Proposition d'une méthodologie pour les émissions de CO₂ d'un service informatique hébergé dans un data center

Chapitre 6

Une méthodologie intégrée pour l'évaluation de l'impact CO₂ de l'infrastructure IT virtualisée

6.1 Préliminaire : définition d'une méthodologie

“Une méthodologie est l’analyse théorique et systématique appliquée à un domaine d’étude. Elle comprend l’analyse théorique du corps des méthodes et les principes associés avec la branche de connaissance. Typiquement, elle englobe des concepts comme le paradigme, le modèle théorique, les phases et les techniques quantitatives et qualitatives.” [Wikipedia, 2004]

“Une méthodologie ne vise pas à fournir des solutions, elle n’est pas par conséquent la même que celle d’une méthode. La méthodologie offre le fondement théorique pour la compréhension de la méthode.” [Wikipedia, 2004]

Généralement, on admet qu’une méthodologie est composée de trois éléments :

1. Des concepts/modèles ;
2. Un processus (souvent appelé «méthode») ;
3. Des outils de support (logiciels, documents, etc.) qui opérationnalisent les concepts et les processus.

6.2 Introduction

Cette partie du mémoire proposera la méthodologie afin d’évaluer les émissions de CO₂ d’un service informatique hébergé dans un data center. La schématisation de la problématique est donnée à la Figure 6.1. Le client hébergeant des applications dans un data center aimerait connaître les émissions de CO₂ relatives à ses différentes applications hébergées. Pour satisfaire cette demande, le data center doit mettre en place au sein de son établissement une comptabilisation des émissions de CO₂ fine afin d’identifier les émissions des services du client.

Pour ce faire, nous proposons une méthodologie, c’est-à-dire un modèle, un processus et un outil de support. Pour ce faire, nous allons dans un premier temps décrire le processus

(la méthode) et les différents concepts afin de réaliser l'évaluation de CO₂. Ensuite, nous verrons l'outil Excel développé afin de faciliter le travail. Et enfin, nous terminerons par une étude de cas fictive afin de mettre en oeuvre les différentes étapes de ce processus.

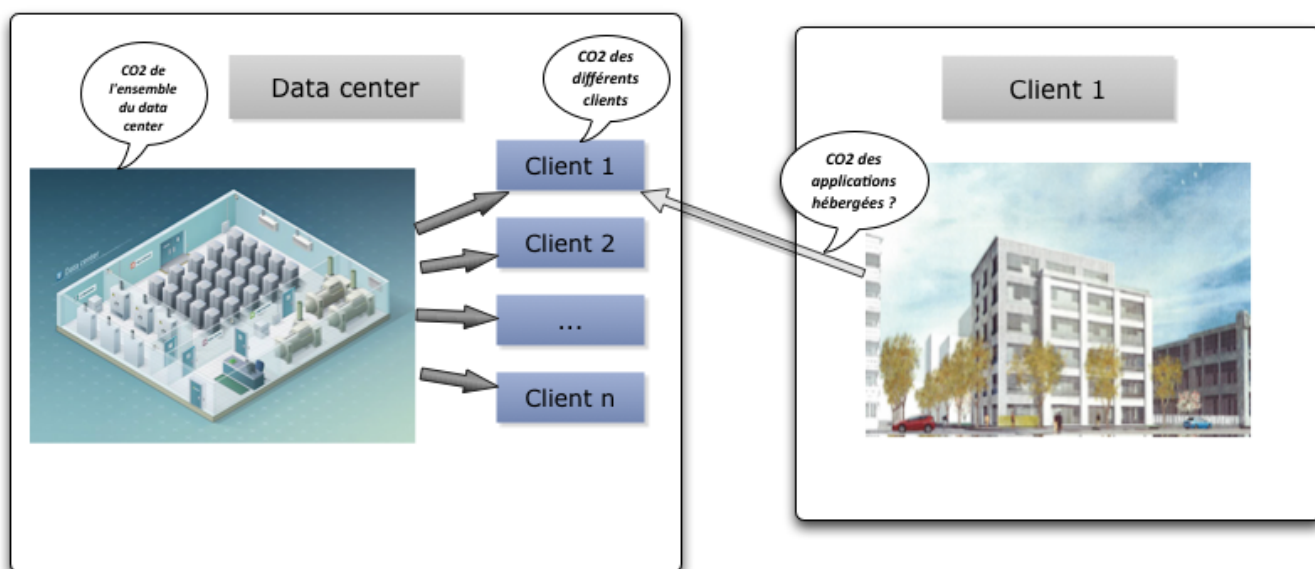


FIGURE 6.1 – But de la méthodologie proposée

6.3 Processus (méthode)

Le processus développé présente six étapes à réaliser les unes à la suite des autres (Figure 6.2) et permettra à la fin de connaître les émissions de CO₂ d'un service en particulier durant l'année courante. Nous allons passer en revue ces différentes étapes dans la suite de cette section. Dans cette description, nous allons mentionner les éléments que nous reprenons des méthodes de mesures de CO₂ présentées dans le chapitre 4 mais aussi ajouter des éléments nouveaux (comme la méthode ABC).

Il faut noter que cette méthodologie va s'appliquer à un service d'un client en particulier dont on veut connaître ses émissions de CO₂ (par exemple, le service fourni par Google «Google Mail»).

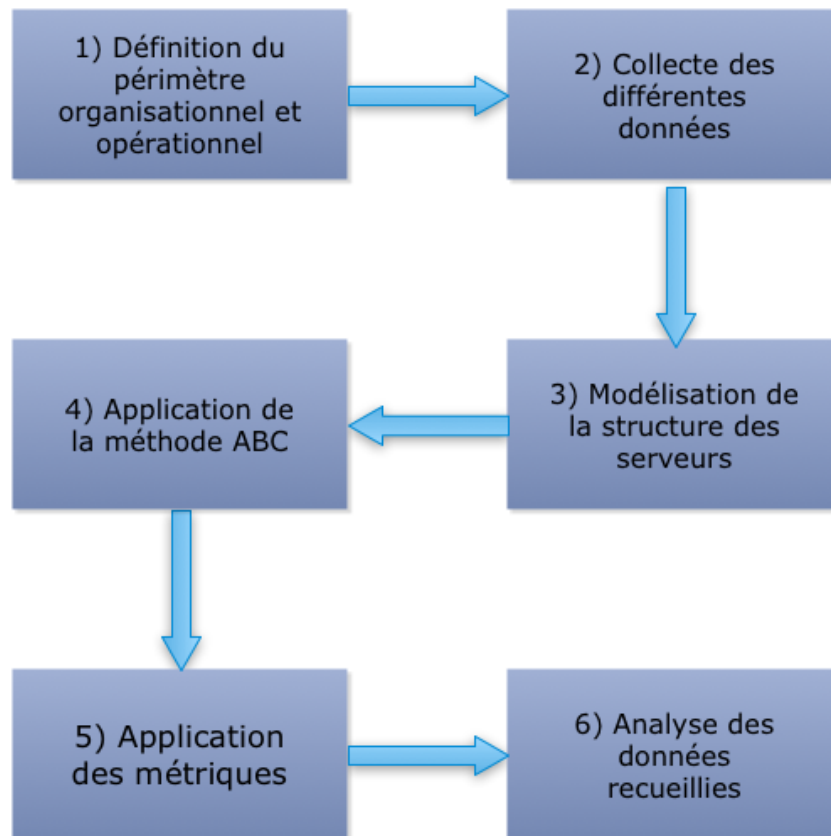


FIGURE 6.2 – Schéma des différentes étapes du processus

6.3.1 Définition du périmètre organisationnel et opérationnel

Cette étape du processus vise à définir le périmètre d'étude, c'est-à-dire ce que l'on va prendre en compte. Ce périmètre est divisé en deux : d'une part il y a le périmètre organisationnel (installation ou les sites concernés par l'évaluation) et d'autre part le périmètre opérationnel (tout ce qui est lié aux activités du périmètre organisationnel).

Le périmètre organisationnel d'un data center sera le site sur lequel le bâtiment est installé. Quant au périmètre opérationnel, il faudra dans un premier temps faire un inventaire précis des différents équipements IT et non IT présents à l'intérieur du périmètre organisationnel. Cette étape est primordiale afin que les données résultantes à la fin de ce processus soient le plus fiable possible. Le périmètre opérationnel (Tableau 6.1) sera composé des équipements IT et non IT présents dans les enceintes du data center, l'énergie grise du bâtiment et les activités relatives au bon fonctionnement du service offert par le data center (qui est dans notre cas l'offre de cloud computing) qui seront nécessaires afin d'implémenter la méthode ABC.

| Périmètre opérationnel | |
|---------------------------|---|
| Equipements IT | Baie de disques |
| | Serveur informatique |
| | PC de gestion |
| | Laptop |
| | All-in-one |
| | LCD |
| | Switch/routeur/firewall |
| | |
| Equipements non IT | Rack |
| | Tableau électrique |
| | Climatisation |
| | Groupe de secours |
| | Ventilation |
| | |
| Activités | Fonctionnement des serveurs |
| | Fonctionnement de la climatisation |
| | Service de sécurisation du data center |
| | Fonctionnement des générateurs de secours |

TABLE 6.1 – Périmètre opérationnel du data center

6.3.2 Collecte des différentes données

Comme dit précédemment dans le chapitre 4, la collecte des données est une étape très importante et déterminera la finesse du résultat final. Il faut essayer de collecter un maximum de données en rapport avec le périmètre organisationnel et opérationnel défini dans l'étape précédente. Comme dans la méthode ADEME et CIGREF, la collecte de données doit principalement se focaliser sur des données primaires (Figure 4.9), c'est-à-dire celles prélevées des systèmes d'information et relevés physiques. Si les données primaires ne sont pas toutes disponibles, alors il faudra se tourner vers des données secondaires ou extrapolées, en gardant bien en tête que le résultat final ne sera pas aussi précis qu'avec des données primaires.

Nous allons maintenant lister les différentes données à récolter afin d'appliquer la méthodologie proposée. Les sections suivantes sont en rapport avec le prototype que nous allons présenter dans le chapitre suivant. Elles permettent de récolter les données afin de remplir le prototype Excel. Ces différentes données sont importantes à prendre en compte, car nous allons pour déterminer les émissions de CO₂ relatives aux équipements nous baser sur ADEME et CIGREF qui donne des données génériques afin de transformer les équipements en émissions de CO₂ (Annexe A).

6.3.2.1 Energie grise du bâtiment

L'énergie grise d'un bâtiment est "la quantité d'énergie nécessaire à la production et à la fabrication des matériaux ou des produits industriels. [Wikipedia, 2005b]" C'est-à-dire dans le cas du data center, l'ensemble des matériaux nécessaires à la construction de celui-ci : murs en béton, escaliers, portes, etc. De plus, un bilan d'énergie grise additionne l'énergie dépensée lors :

- de la conception du produit ou du service ;
- de l'extraction et le transport des matières premières ;
- de la transformation des matières premières ;
- le recyclage.

Les données à récolter ici sont simples : ce sont la taille du data center (en m²) et le nombre d'années d'amortissement du bâtiment. Ensuite, grâce aux données provenant du Centre de management du carbon à Edinburgh [Edinburgh Centre for Carbon Management Ltd., 2006] et qui donnent un aperçu des matériaux de base employés pour la construction de l'« enveloppe » du bâtiment, on pourra calculer les émissions de CO₂ grâce aux deux données.

6.3.2.2 Phase de fabrication et de fin de vie des équipements IT

Les données à récolter sont listées dans le Tableau 6.2.

| Type de matériel | Unité | Années d'amortissement |
|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| Baie de disques | nombre de baies | nombre d'années |
| Serveur informatique | nombre de serveurs | nombre d'années |
| PC de gestion | nombre de PC de gestion | nombre d'années |
| Laptop | nombre de laptop | nombre d'années |
| All-in-one | nombre de All-in-one | nombre d'années |
| LCD | nombre de LCD | nombre d'années |
| Switch/routeur/firewall | kg d'équipement | nombre d'années |

TABLE 6.2 – Données à récolter des équipements IT pour la phase de fabrication et de fin de vie

Ces données proviennent du "Guide D'évaluation ADEME" [Ademe et Cigref, 2012]. Voici comment sont calculés les chiffres dans ce guide : les baies de disques, les serveurs, les PC de gestion, les laptops, les All-in-one sont calculés en unité tandis que les routeurs/switch/firewall sont calculés en Kg d'équipement. La différence d'unité de mesure provient du Guide d'évaluation de ADEME. Le nombre d'années d'amortissement permet de répartir les émissions de CO₂ relatives aux différents équipements tout au long de leur durée de vie.

Voici les données génériques utilisées qui sont reprises de ADEME et CIGREF. Les approximations sur la méthode d'obtention de ces chiffres par ADEME et CIGREF est quant à elle décrite dans l'Annexe A.

- Baies de disques : 15,5 kg eCO₂ / unité (durée de vie d'environ 7 ans) ;
- Serveurs informatiques : 600 kg eCO₂ / unité (durée de vie d'environ 5 ans) ;
- PC gestion : 305 kg eCO₂ / unité ;
- Laptops : 203 kg eCO₂ / unité ;
- All-in-one : 501 kg eCO₂ / unité ;
- Switch/routeur/firewall : 80 kg eCO₂ / kg d'équipement (durée de vie d'environ 7 ans) ;
- LCD : 336 kg eCO₂.

6.3.2.3 Phase de fabrication et de fin de vie des équipements non IT

Les données à récolter sont listées dans le Tableau 6.3.

| Type de matériel | Unité | Années d'amortissement |
|--------------------|--------------------------------|------------------------|
| Rack | nombre de racks | nombre d'années |
| Tableau électrique | nombre de tableaux électriques | nombre d'années |
| Climatisation | kg d'équipement | nombre d'années |
| Groupe de secours | kg d'équipement | nombre d'années |
| Ventilation | kg d'équipement | nombre d'années |

TABLE 6.3 – Données à récolter des équipements non IT pour la phase de fabrication et de fin de vie

Ces données proviennent du «Guide D'évaluation ADEME» [Ademe et Cigref, 2012]. Voici comment sont calculés les chiffres : les racks et les tableaux électriques sont calculés en unité tandis que la climatisation, les groupes électrogènes et la ventilation sont calculés en Kg d'équipement. La différence d'unité de mesure provient du Guide d'évaluation de ADEME. Le nombre d'années d'amortissement permet de répartir les émissions de CO₂ relatives aux différents équipements tout au long de leur durée de vie.

Voici les données génériques utilisées qui sont reprises de ADEME et CIGREF. Les approximations sur la méthode d'obtention de ces chiffres par ADEME et CIGREF est quant à elle décrite dans l'Annexe A.

- Racks : 500 kg eCO₂ / unité ;
- Tableaux électriques : 680 kg eCO₂ / unité ;
- Climatisation : 13 kg eCO₂ / kg d'équipement ;
- Groupe de secours : 1,8 eCO₂ / kg d'équipement ;
- Ventilation : 5 kg eCO₂ / kg d'équipement.

6.3.2.4 Phase d'utilisation des équipements IT

Les données à récolter sont listées dans le Tableau 6.4. Il faut noter que dans le cas des serveurs, il faut collecter l'électricité consommée par les serveurs un par un et non pour l'ensemble des serveurs.

| Type de matériel | Unité |
|-------------------------|---------------------------------|
| Baie de disques | électricité consommée en kWh/an |
| Serveur informatique | électricité consommée en kWh/an |
| PC de gestion | électricité consommée en kWh/an |
| Laptop | électricité consommée en kWh/an |
| All-in-one | électricité consommée en kWh/an |
| LCD | électricité consommée en kWh/an |
| Switch/routeur/firewall | électricité consommée en kWh/an |

TABLE 6.4 – Données à récolter des équipements IT pour la phase d'utilisation

Pour transformer ces kWh/an en émissions de CO₂, il faudra utiliser les coefficients d'émissions de CO₂ définis dans la suite de ce chapitre (section 6.3.5)

6.3.2.5 Phase d'utilisation des équipements non IT

Les données à récolter afin de remplir le prototype sont listées dans le Tableau 6.5

| Type de matériel | Unité |
|--------------------|---------------------------------|
| Rack | électricité consommée en kWh/an |
| Tableau électrique | électricité consommée en kWh/an |
| Climatisation | électricité consommée en kWh/an |
| Groupe de secours | fuel consommé en litre |
| Ventilation | électricité consommée en kWh/an |

TABLE 6.5 – Données à récolter des équipements non IT pour d'utilisation

Pour transformer ces kWh/an en émissions de CO₂, il faudra utiliser les coefficients d'émissions de CO₂ définis dans la suite de ce chapitre (section 6.3.5)

6.3.2.6 Préparer la méthode ABC

Pour utiliser la méthode ABC par la suite, il faut définir une série d'activités relative au service offert par le data center aux client. Pour ce faire, le **processus** que nous allons prendre en compte est le fait que le data center offre des services de cloud computing à une entreprise utilisant un service en particulier. Ce processus sera divisé en plusieurs **activités** listées dans le périmètre opérationnel et qui contribuent au bon fonctionnement de celui-ci :

- Fonctionnement des serveurs et l'activité reprend :
 - ☐ la phase de fabrication et de fin de vie des serveurs, des switches/routeurs/firewall et des baies de disques ;
 - ☐ la phase d'utilisation des serveurs, des switches/routeurs/firewall et des baies de disques.
- Fonctionnement de la climatisation et l'activité reprend :
 - ☐ la phase de fabrication et de fin de vie de la climatisation et de la ventilation ;
 - ☐ la phase d'utilisation de la climatisation et de la ventilation.
- Services de sécurisation du data center et l'activité reprend :
 - ☐ la phase de fabrication et de fin de vie des pc de gestion, des laptops des all-in-one, des écrans LCD et des tableaux électriques ;
 - ☐ la phase d'utilisation des pc de gestion, des laptops des all-in-one, des écrans LCD et des tableaux électriques.
- Fonctionnement des générateurs de secours et l'activité reprend :
 - ☐ la phase de fabrication et de fin de vie des groupes de secours ;
 - ☐ la phase d'utilisation des groupes de secours.

Chaque activité va regrouper d'une part, la phase de fabrication et de fin de vie des équipements IT ou non IT liés à cette activité et d'autre part, la phase d'utilisation des équipements en rapport avec l'activité.

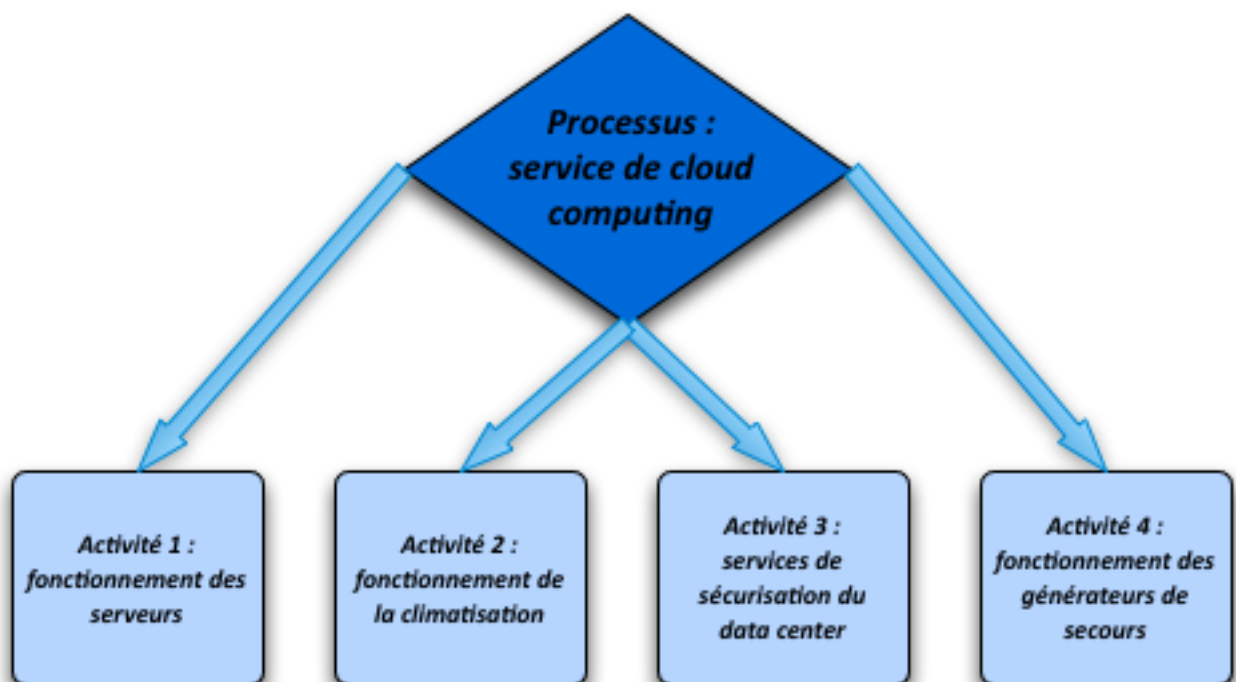


FIGURE 6.3 – Schéma du processus lié au data center

6.3.3 Modélisation de la structure des serveurs

La modélisation de la structure des serveurs et de sa virtualisation, permettra de mieux appréhender la complexité afin de rendre compte des émissions de CO₂ en particulier.

Le logiciel de virtualisation (hyperviseur) ajoute de la flexibilité dans les serveurs. En effet, un logiciel peut migrer d'une ressource physique vers une autre (Figure 6.4). Ainsi, si un serveur tombe en panne, toutes les machines virtuelles présentes à l'intérieur de ce serveur sont transférées vers un autre serveur presque immédiatement.

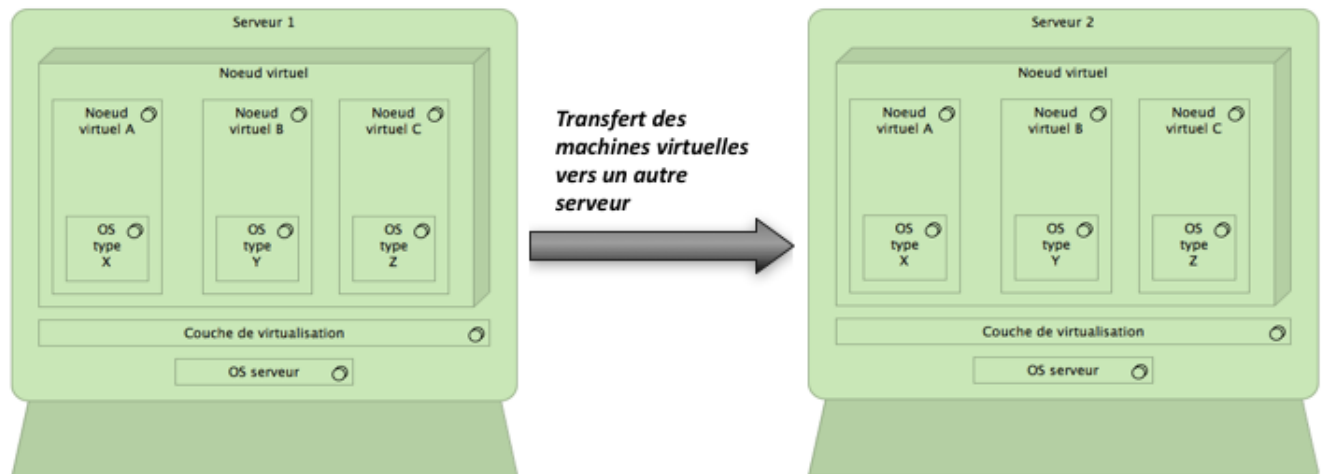


FIGURE 6.4 – Transfert d'une machine physique vers une autre si le serveur est en maintenance ou en panne

Il faudra donc bien identifier la décomposition d'un service en ressources logicielles et suivre sa trace afin de savoir sur quelle ressource physique elle est déployée. La Figure 6.5 permet d'une part d'avoir une vue globale de l'organisation du serveur (voir les services décomposés en différents logiciels tournant sur un noeud virtuel spécifique) et d'autre part d'avoir une vue dynamique en indiquant quel logiciel a effectivement tourné sur quel noeud pendant une période considérée. En effet, grâce au logiciel de virtualisation (VmWare le plus souvent), des données sur le pourcentage d'utilisation de chaque machine virtuelle est disponible. Il faudra s'en servir afin de savoir le pourcentage de CPU consommé par le service

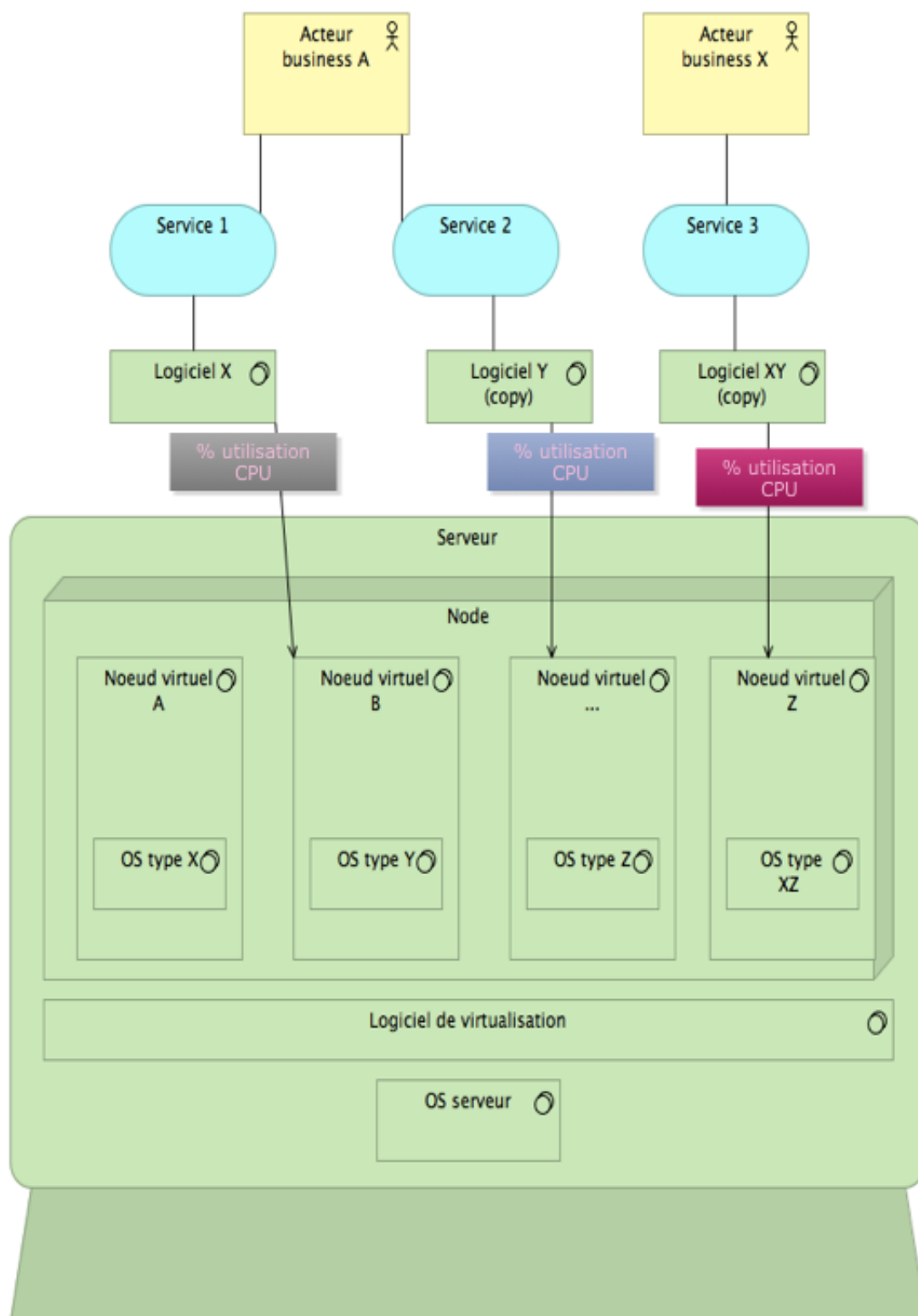


FIGURE 6.5 – Architecture typique avec virtualisation

6.3.4 Application de la méthode ABC

Nous allons dans cette section appliquer la méthode ABC à notre problématique, ce qui n'a jamais été fait dans les autres méthodes de mesures de CO₂. Pour ce faire, nous allons réutiliser les différents concepts vus dans le chapitre 5. Le résultat final de la méthode ne sera pas le coût en euros pour le client, mais sera donné en terme d'émissions de CO₂ grâce à la transformation des kWh en eCO₂.

Après avoir identifié les différentes activités relatives au processus, il faut maintenant faire le tableau en trouvant pour chaque activité l'inducteur qui la représente

| Index | Activité | Coût de l'activité | Inducteur d'activité | Volume de l'inducteur |
|-------|---|--------------------|--|-----------------------|
| A1 | Fonctionnement du serveur | kWh/an consommé | % de CPU utilisé par le service | kWh |
| A2 | Fonctionnement de la climatisation | kWh/an consommé | nombre de services dans le data center | kWh |
| A3 | Services de sécurisation du data center | kWh/an consommé | nombre de services dans le data center | kWh |
| A4 | Fonctionnement des générateurs de secours | kWh/an consommé | nombre de services dans le data center | kWh |

TABLE 6.6 – Activités du processus d'offre de cloud computing

Grâce au pourcentage de CPU utilisé par le service sur le serveur, nous allons pouvoir imputer les kWh consommé par le service au client. Les activités A2, A3 et A4 sont quant à elle des activités partagées. C'est-à-dire que l'on va répartir leur consommation sur l'ensemble des services présents dans le data center.

En plus d'une comptabilisation par clients, le gestionnaire du data center peut utiliser ses chiffres à son propre compte. Il peut voir où les consommations électriques et en CO₂ sont les plus importantes.

6.3.5 Application des métriques

Après avoir appliqué la méthode ABC, il faut transformer les résultats obtenus en émissions de CO₂. Pour ce faire, il faut utiliser un facteur d'émissions propre à chaque pays. Les facteurs d'émission sont des coefficients qui quantifient l'émission par unité d'activité. Les

émissions sont estimées en multipliant le facteur d'émission par les données sur les activités correspondantes. La Table 6.7 donne les différents facteurs d'émissions pour la Wallonie. Ces données devront être adaptées en fonction du pays où le data center se trouve (voir [Brander et al, 2011] pour la liste des pays avec leur coefficient d'émissions de CO₂).

| Combustion | Source | CWaPE : kgCO ₂ /kWh |
|-------------|----------------------|--------------------------------|
| Gaz | Gaz de cokerie | / |
| Gaz | Gaz de haut fourneau | / |
| Gaz | Gaz Naturel | 0,251 |
| Liquide | Essence | / |
| Liquide | Gasoil | 0,306 |
| Liquide | Fuel-oil loud | 0,310 |
| Liquide | GPL | 0,267 |
| Solide | Charbon | 0,385 |
| Electricité | Centrale électrique | 0,456 |

TABLE 6.7 – Coefficients d'émissions de CO₂ provenant du CWaPE [Huart, 2012]

6.3.6 Analyse des données recueillies

Lorsque toutes les étapes sont terminées, les chiffres des émissions de CO₂ d'un client peuvent lui être transmis. De plus, grâce à la méthode ABC, le gestionnaire du data center aura une vue globale sur ce qui est consommateur d'énergie et ce qui est le plus producteur de CO₂. Avec ces chiffres, il peut prendre des mesures afin de diminuer la consommation électrique et par conséquent ses émissions de CO₂.

Chapitre 7

Prototype d'outil logiciel de support à l'évaluation de CO₂ d'un service hébergé dans un data center

7.1 Explication

Chaque tableau présent dans les sections suivantes sert à automatiser le calcul des émissions de CO₂ des différentes étapes lors de la collecte des données (étape définie dans le chapitre 6) :

1. Energie grise du bâtiment
2. Phase de fabrication et de fin de vie des équipements IT
3. Phase de fabrication et de fin de vie des équipements non IT
4. Phase d'utilisation des équipements IT
5. Phase d'utilisation des équipements non IT
6. Tableau final reprenant l'ensemble des informations et la méthode ABC

Le dernier tableau intitulé «Tableau final reprenant l'ensemble des informations et la méthode ABC» permet de réaliser la méthode ABC qui utilise les différents éléments des tableaux précédents (comme expliqué dans le chapitre 6).

7.1.1 Energie grise du bâtiment

Dans la Figure 7.1, les cases à remplir sont en jaunes. Il faut indiquer la superficie du data center et le nombre d'années d'amortissement du bâtiment.

| Energie grise du bâtiment | | |
|---------------------------------------|------------------|---------------------------------|
| Superficie du DC en m2 | | |
| Nombre d'années d'amortissement | | |
| | | |
| | Kilo eCO2 par m2 | Kilo eCO2 en rapport avec le DC |
| Matériaux - Enveloppe du bâtiment | | |
| | | |
| Fondations (béton) | | |
| Planchers (dalle en béton, isolation) | | |
| Plafonds | | |
| Structure (poutrelles) | | |
| Murs extérieurs | | |
| Cloison intérieures | | |
| Escaliers | | |
| Fêtres | | |
| Portes | | |
| Toit | | |
| | | |
| Total | A1 | A2 |

FIGURE 7.1 – Tableau pour le calcul de l'énergie grise d'un data center

7.1.2 Phase de fabrication et de fin de vie des équipements IT

Dans la Figure 7.2, il faut indiquer pour chaque équipement IT le nombre ou les kilogrammes d'équipement et le nombre d'années d'amortissement. Les calculs sont alors effectués comme suit (les "eCO₂ de l'équipement" sont définis dans le chapitre 6 à la section 6.3.2.2) :

$$\text{kg de eCO}_2 \text{ par unité ou par kg d'équipement} = \frac{\text{eCO}_2 \text{ de l'équipement} \times \text{nombre ou kg}}{\text{nombre d'années d'amortissement}} \quad (7.1)$$

$$\text{Total équipement IT} = \sum_{i=1}^7 B_i \quad (7.2)$$

| Phase de fabrication et de fin de vie | | | | |
|---------------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|----|
| Equipement IT | | | | |
| | Nombre | Nombre années d'amortissement | kg de eCO2 par unité | |
| Baies de disque | | | B1 | |
| Serveurs | | | B2 | |
| PC gestion | | | B3 | |
| Laptop | | | B4 | |
| All-in one | | | B5 | |
| LCD | | | B6 | |
| | | | | |
| | Kg d'équipement | | Kg de CO2 par kg d'équipement | |
| Switch/routeur/firewall | | | B7 | |
| | | | | |
| | | | Total équipement IT | B8 |

FIGURE 7.2 – Tableau pour le calcul des émissions de CO₂ durant la phase de fabrication et de fin vie des équipements IT

7.1.3 Phase de fabrication et de fin de vie des équipements non IT

Dans la Figure 7.3, il faut indiquer pour chaque équipement non IT le nombre ou les kilogrammes d'équipement et le nombre d'années d'amortissement. Les calculs sont alors effectués comme suit (les "eCO₂ de l'équipement" sont définis dans le chapitre 6 à la section 6.3.2.3) :

$$\text{kg de eCO}_2 \text{ par unité ou par kg d'équipement} = \frac{\text{eCO}_2 \text{ de l'équipement} \times \text{nombre ou kg}}{\text{nombre d'années d'amortissement}} \quad (7.3)$$

$$\text{Total équipement non IT} = \sum_{i=1}^5 C_i \quad (7.4)$$

| Phase de fabrication et de fin de vie | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------|-------------------------------|---|-------------------------|----|
| Équipement non IT | | | | | |
| | Nombre | Nombre années d'amortissement | kg de eCO ₂ par unité | | |
| Racks | | | C1 | | |
| Tableaux électriques | | | C2 | | |
| | Kg d'équipement | | Kg de CO ₂ par kg d'équipement | | |
| Climatisation | | | C3 | | |
| Groupe de secours | | | C4 | | |
| Ventilation | | | C5 | | |
| | | | | Total équipement non IT | C6 |

FIGURE 7.3 – Tableau pour le calcul des émissions de CO₂ durant la phase de fabrication et de fin de vie des équipements non IT

7.1.4 Phase d'utilisation des équipements IT

Dans la Figure 7.4, il faut indiquer pour chaque équipement IT le nombre de kWh/an consommé. Les calculs sont alors effectués comme suit :

$$\text{Transformation kWh} \rightarrow \text{CO}_2 = \text{nombre de kWh} \times \text{facteur d'émission du pays} \quad (7.5)$$

$$\text{Total équipement IT} = \sum_{i=1}^7 D_i \quad (7.6)$$

| Phase d'utilisation Equipement IT | | | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------|----|
| | | | | |
| | Electricité consommée (kWh/an) | Tranformation kWh -> eCO2 | | |
| Baies de disque | | D1 | | |
| Serveurs | | D2 | | |
| PC gestion | | D3 | | |
| Laptop | | D4 | | |
| All-in one | | D5 | | |
| LCD | | D6 | | |
| | | | | |
| Switch/routeur/firewall | | D7 | | |
| | | | Total équipement IT | D8 |

FIGURE 7.4 – Tableau pour le calcul des émissions de CO₂ durant la phase d'utilisation des équipements IT

7.1.5 Phase d'utilisation des équipements non IT

Dans la Figure 7.5, il faut indiquer pour chaque équipement non IT le nombre de kWh/an consommés.

Transformation kWh→CO₂ = nombre de kWh ou litres×facteur d'émission du pays (7.7)

$$\text{Total équipement non IT} = \sum_{i=1}^5 E_i \quad (7.8)$$

| Phase d'utilisation Equipement non IT | | | | |
|--|--|---------------------------|-------------------------|----|
| | | | | |
| | Electricité consommée (kWh/an) ou fuel (litres) | Tranformation kWh -> eCO2 | | |
| Racks | | E1 | | |
| Climatisation | | E2 | | |
| Groupe de secours | | E3 | | |
| Ventilation | | E4 | | |
| Tableaux électriques | | E5 | | |
| | | | Total équipement non IT | E6 |

FIGURE 7.5 – Tableau pour le calcul des émissions de CO₂ durant la phase d'utilisation des équipements non IT

7.1.6 Tableau final reprenant l'ensemble des informations et la méthode ABC

La Figure 7.6 montre l'application de la méthode ABC dans le cas de notre problématique. Dans ce tableau Excel, on peut y retrouver les différentes **activités** du **processus** «Offre de cloud computing» : le fonctionnement de la climatisation, service de sécurisation

du data center, approvisionnement des générateurs de secours et le fonctionnement des serveurs (ici divisé en plusieurs serveurs en fonction du nombre présent dans le data center). On peut remarquer que les activités ne sont pas toutes regroupées. En effet, il y a les activités partagées, c'est-à-dire les activités génératrices de CO₂ qui sont identiques pour tous les services présents dans le data center. Ensuite, nous avons l'activité par serveur, où il faut indiquer le pourcentage d'utilisation du service sur les différents serveurs, mais aussi le nombre de services présents dans le serveur numéro X et sa consommation en kWh/an. Lorsque toutes les données sont introduites, le calcul s'effectuera de façon automatique.

Les calculs de la feuille sont alors effectués comme suit :

$$F1 = C3 + C5 + E2 + E4 \quad (7.9)$$

$$F2 = \frac{F1}{X1} \quad (7.10)$$

$$F3 = B3 + B4 + B5 + B6 + D3 + D4 + D5 + D6 + C2 + E5 \quad (7.11)$$

$$F4 = \frac{F3}{X1} \quad (7.12)$$

$$F5 = C4 + E3 \quad (7.13)$$

$$F6 = \frac{F5}{X1} \quad (7.14)$$

$$F7 = F1 + F3 + F5 \quad (7.15)$$

$$F8 = F2 + F4 + F6 \quad (7.16)$$

$$F9 \rightarrow F13 = X12 \rightarrow X16 \times \frac{X2 \rightarrow X6}{100} \quad (7.17)$$

$$F14 \rightarrow F18 = \text{facteur d'émission du pays} \times F9 \rightarrow F13 \quad (7.18)$$

$$F19 = \sum_{i=14}^{18} F_i + \frac{A2}{X1} + \frac{(B1 + B2 + B7 + D1 + D7)}{X1} \quad (7.19)$$

Explication de la Figure 7.6 :

La Figure 7.6 reprend les activités listées dans le périmètre opérationnel du data center mais est ici divisé en deux types d'activités : d'une part celles qui sont partagées par tous les services présents dans le data center (fonctionnement de la climatisation, service de sécurisation du data center, fonctionnement des générateurs de secours) et celle qui est spécifique au service que l'on veut identifier ses émissions de CO₂ (activités par serveur). En

effet, les activités partagées doivent être répartie pour tous les services tandis que l'activité par serveur concerne uniquement le service dont on s'occupe.

L'équation 7.19 calcule l'équivalent CO_2 du service dont on voulait connaître ses émissions. Pour ce faire, il faut reprendre :

- les cases F14 jusque F18, pour les émissions émises sur chaque serveur ;
- l'énergie grise du bâtiment qui sera divisée par le nombre de services dans le data center ;
- les phases de fabrication, de fin de vie et d'utilisation pour les serveurs, baies de disques et switches/routeurs/firewall qui seront divisées aussi par le nombre de services dans le data center.

| Méthode ABC | | | | |
|---|--|---------------------------------|----------------------------------|-----------------|
| Nombre de services | X1 | | | |
| Activités partagées | | | | |
| | Consommation (eCO2) total par activité | Consommation (eCO2) par service | | |
| Fonctionnement de la climatisation | F1 | F2 | | |
| Service de sécurisation du data center | F3 | F4 | | |
| Approvisionnement des générateurs de secours | F5 | F6 | | |
| Total activités partagées | F7 | F8 | | |
| | | | | |
| Activités par serveur | | | | |
| | | | | |
| % d'utilisation CPU du service sur le serveur 1 | X2 | | | |
| % d'utilisation CPU du service sur le serveur 2 | X3 | | | |
| % d'utilisation CPU du service sur le serveur 3 | X4 | | | |
| | X5 | | | |
| % d'utilisation CPU du service sur le serveur n | X6 | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| Serveur 1 | Nombre de services | Consommation kWh/an | Consommation du service (kWh/an) | eCO2 du service |
| Serveur 2 | X7 | X12 | F9 | F14 |
| Serveur 3 | X8 | X13 | F10 | F15 |
| ... | X9 | X14 | F11 | F16 |
| Serveur n | X10 | X15 | F12 | F17 |
| | X11 | X16 | F13 | F18 |
| Total (kg eCO2) : partagées + serveur = ABC | | | | |
| F19 | | | | |

FIGURE 7.6 – Tableau de calcul pour la méthode ABC

Chapitre 8

Etude de cas fictive

Dans ce chapitre, nous allons appliquer le processus (méthode) défini dans le chapitre 6 sur un cas fictif. Ce chapitre prendra l'exemple d'un data center de taille moyenne, mais sans avoir d'informations précises. Nous prenons comme hypothèse que le data center a une superficie de $160m^2$ et que le bâtiment est amorti sur une période de 20 ans.

Nous voulons savoir le nombre d'émissions de CO_2 que le service offert par l'Université «Webcampus» outsourcé dans le data center produit.

8.1 1^{ère} étape : définition du périmètre organisationnel et opérationnel

Les différents périmètres du data center seront définis comme suit :

Périmètre organisationnel : la bâtiment qui abrite les différents serveurs = data center.

Périmètre opérationnel : les équipements IT et non IT présents à l'intérieur du périmètre organisationnel

- serveurs informatiques ;
- baies de disques (baies de stockages) ;
- équipements réseaux (switch, routeur, etc.) ;
- racks ;
- baies de disques ;
- tableaux électriques ;
- groupes de secours ;
- ventilation ;
- pc de gestion ;
- laptop ;
- all-in-one ;
- LCD.

8.2 2^{ème} étape : collecte des données

Nous allons maintenant passer en revue les différentes étapes pour la collecte des données. Les données recueillies sont listées dans les Tableaux 8.1, 8.2, 8.3, 8.4.

Phase de fabrication et de fin de vie des équipements IT

| Type de matériel | Unité | Chiffre | Nombre d'années d'amortissement |
|-------------------------|-------------------------|---------|---------------------------------|
| Baie de disques | nombre de baies | 10 | 7 |
| Serveur informatique | nombre de serveurs | 45 | 5 |
| PC de gestion | nombre de PC de gestion | 15 | 4 |
| Laptop | nombre de laptop | 5 | 4 |
| All-in-one | nombre de All-in-one | 0 | 4 |
| LCD | nombre de LCD | 5 | 4 |
| Switch/routeur/firewall | kg d'équipement | 15 | 7 |

TABLE 8.1 – Données récoltées des équipements IT pour la phase de fabrication et de fin de vie

Phase de fabrication et de fin de vie des équipements non IT

| Type de matériel | Unité | Chiffre | Nombre d'années d'amortissement |
|--------------------|--------------------|---------|---------------------------------|
| Rack | nombre de racks | 10 | 12 |
| Tableau électrique | nombre de tableaux | 5 | 20 |
| Climatisation | kg d'équipement | 600 | 13 |
| Groupe de secours | kg d'équipement | 1000 | 12 |
| Ventilation | kg d'équipement | 300 | 10 |

TABLE 8.2 – Données récoltées des équipements non IT pour la phase de fabrication et de fin de vie

Phase d'utilisation des équipements IT

| Type de matériel | Consommation (kWh/an) |
|-------------------------|-----------------------|
| Baie de disques | 6 500 |
| Serveur informatique | 4 500 |
| PC de gestion | 300 |
| Laptop | 200 |
| All-in-one | 0 |
| LCD | 300 |
| Switch/routeur/firewall | 2000 |

TABLE 8.3 – Données récoltées des équipements IT lors de la phase d'utilisation

Phase d'utilisation des équipements non IT

| Type de matériel | Consommation (kWh/an) |
|--------------------|-----------------------|
| Rack | 5 000 |
| Tableau électrique | 3 000 |
| Climatisation | 2 000 |
| Groupe de secours | 1 500 |
| Ventilation | 300 |

TABLE 8.4 – Données récoltées des équipements non IT lors de la phase d'utilisation

Autres données

- Le service utilise principalement le serveur 1 à hauteur de 13% de CPU ;
- Au cours de l'année écoulée, le service est transféré sur un autre serveur quelques fois durant l'année (cause de maintenance ou panne du serveur) et utilise le serveur 2 à hauteur de 2%. Les autres serveurs ne sont pas utilisés par ce service ;
- Le nombre de services présents dans le serveur est de 4.

8.3 3^{ème} étape : modélisation de la structure du serveur

Nous allons donc utiliser ArchiMate afin de modéliser la structure du serveur virtualisée (Figure 8.1) où les différents services se trouvent. Les chiffres correspondants au pourcentage sont le pourcentage d'utilisation CPU grâce aux chiffres obtenus par VMWare ou tout autre logiciel d'hypervision. La modélisation du deuxième serveur n'est pas présentée ici, mais est sensiblement la même que la première.

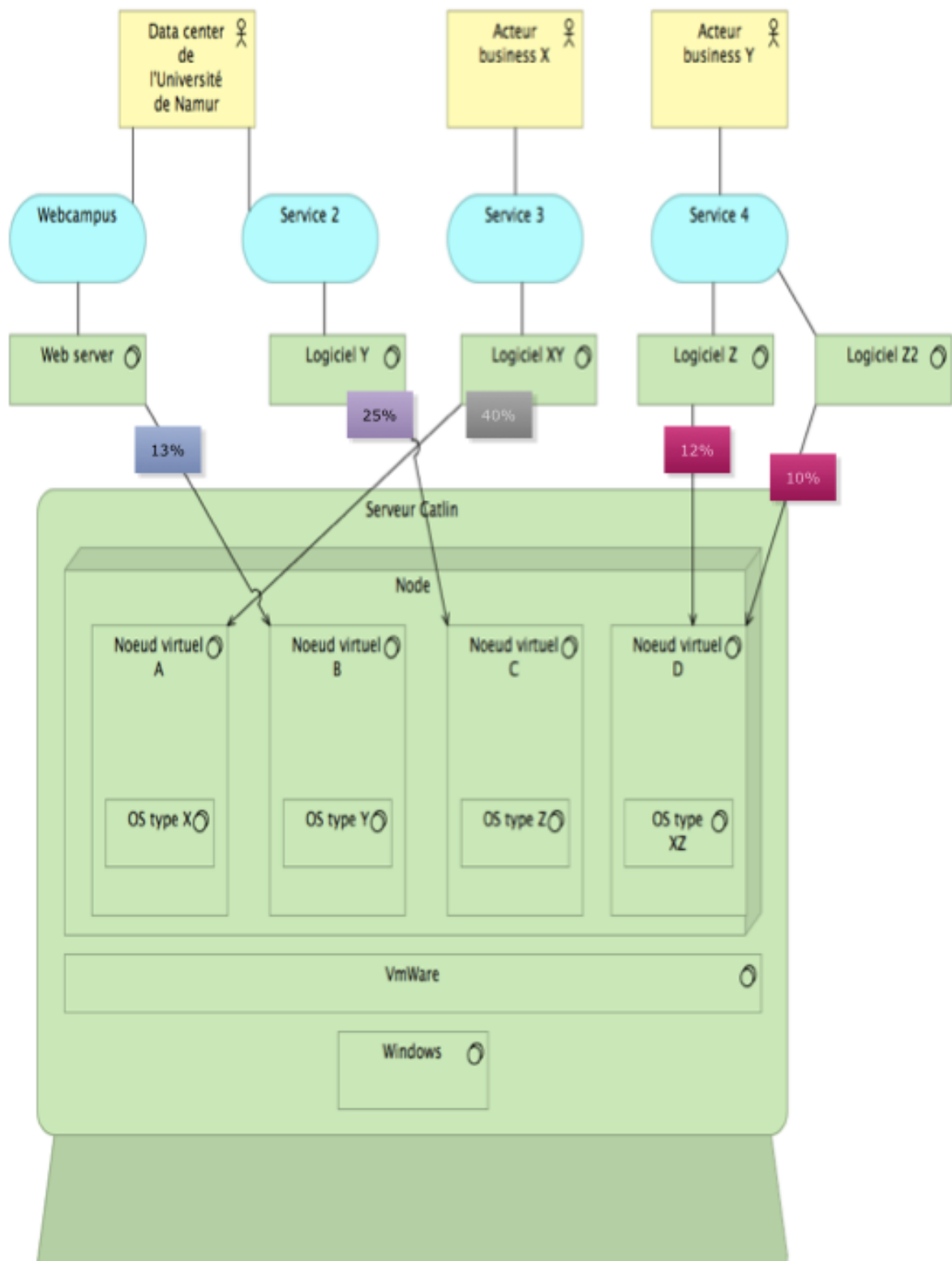


FIGURE 8.1 – Modélisation de la structure du serveur

8.4 4^{ème} étape : Mise en place des données dans les différents tableaux

8.4.1 Energie grise du bâtiment

| Energie grise du bâtiment | | |
|---------------------------------------|------------------|---------------------------------|
| Superficie du DC en m2 | 160 | |
| Nombre d'années d'amortissement | 20 | |
| | | |
| | Kilo eCO2 par m2 | Kilo eCO2 en rapport avec le DC |
| Matériaux - Enveloppe du bâtiment | | |
| | | |
| Fondations (béton) | 4,435 | 709,6 |
| Planchers (dalle en béton, isolation) | 37,64 | 6022,4 |
| Plafonds | 2,17 | 347,2 |
| Structure (poutrelles) | 14,5285 | 2324,56 |
| Murs extérieurs | 30,285 | 4845,6 |
| Cloison intérieures | 8,21 | 1313,6 |
| Escaliers | 1,04 | 166,4 |
| Fêtres | 0,555 | 88,8 |
| Portes | 0,565 | 90,4 |
| Toit | 22,075 | 3532 |
| | | |
| Total | 121,5035 | 19440,56 |

FIGURE 8.2 – Emissions de CO₂ de l'énergie grise du data center

8.4.2 Phase de fabrication et de fin de vie des équipements IT

| Phase de fabrication et de fin de vie | | | | |
|---------------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------|
| Equipement IT | | | | |
| | Nombre | Nombre années d'amortissement | kg de eCO2 | |
| Baies de disque | 10 | 7 | 22,14285714 | |
| Serveurs | 45 | 5 | 5400 | |
| PC gestion | 15 | 4 | 1143,75 | |
| Laptop | 5 | 4 | 253,75 | |
| All-in one | 0 | 4 | 0 | |
| LCD | 5 | 4 | 420 | |
| | | | | |
| | Kg d'équipement | | Kg de CO2 par kg d'équipement | |
| Switch/routeur/firewall | 15 | 7 | 171,4285714 | |
| | | | | |
| | | | Total équipement IT | 6991,071429 |

FIGURE 8.3 – Emissions de CO₂ durant la phase de fabrication et de fin de vie des équipements IT

8.4.3 Phase de fabrication et de fin de vie des équipements non IT

| Phase de fabrication et de fin de vie | | | | |
|---------------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------|
| Équipement non IT | | | | |
| | Nombre | Nombre années d'amortissement | kg de eCO2 | |
| Racks | 10 | 12 | 416,6666667 | |
| Tableaux électriques | 5 | 20 | 170 | |
| | | | | |
| | Kg d'équipement | | Kg de CO2 par kg d'équipement | |
| Climatisation | 600 | 13 | 600 | |
| Groupe de secours | 1000 | 12 | 150 | |
| Ventilation | 300 | 10 | 150 | |
| | | | Total équipement non IT | 1316,666667 |

FIGURE 8.4 – Emissions de CO₂ durant la phase de fabrication et de fin de vie des équipements non IT

8.4.4 Phase d'utilisation des équipements IT

| Phase d'utilisation | | | | |
|-------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------|--------|
| Équipement IT | | | | |
| | Electricité consommée (kWh/an) | Tranformation kWh -> eCO2 | | |
| Baies de disque | 6500 | 2964 | | |
| Serveurs | 4500 | 2052 | | |
| PC gestion | 300 | 136,8 | | |
| Laptop | 200 | 91,2 | | |
| All-in one | 0 | 0 | | |
| LCD | 300 | 136,8 | | |
| | | | | |
| Switch/routeur/firewall | 2000 | 912 | | |
| | | | Total équipement IT | 6292,8 |

FIGURE 8.5 – Emissions de CO₂ durant la phase d'utilisation des équipements IT

8.4.5 Phase d'utilisation des équipements non IT

| Phase d'utilisation | | | | |
|----------------------|--|---------------------------|---------------------|--------|
| Équipement non IT | | | | |
| | Electricité consommée (kWh/an) ou fuel (litres) | Tranformation kWh -> eCO2 | | |
| Racks | 5000 | 2280 | | |
| Climatisation | 3000 | 1368 | | |
| Groupe de secours | 2000 | 912 | | |
| Ventilation | 1500 | 684 | | |
| Tableaux électriques | 300 | 136,8 | | |
| | | | Total équipement IT | 5380,8 |

FIGURE 8.6 – Emissions de CO₂ durant la phase d'utilisation des équipements non IT

8.4.6 Méthode ABC

| Méthode ABC | | | | | |
|--|--|---------------------------------|----------------------------------|-----------------|--|
| Nombre de services | 10 | | | | |
| Activités partagées | | | | | |
| | Consommation (eCO2) total par activité | Consommation (eCO2) par service | | | |
| Fonctionnement de la climatisation | 2802 | 280,2 | | | |
| Service de sécurisation du data center | 1625,5 | 162,55 | | | |
| Fonctionnement des générateurs de secours | 1062 | 106,2 | | | |
| Total activités partagées | 5489,5 | 548,95 | | | |
| | | | | | |
| Activités par serveur | | | | | |
| | | | | | |
| % d'utilisation CPU du service sur le serveur 1 | 13 | | | | |
| % d'utilisation CPU du service sur le serveur 2 | 2 | | | | |
| | | | | | |
| | Nombre de services | Consommation kWh/an | Consommation du service (kWh/an) | eCO2 du service | |
| Serveur 1 | 4 | 500 | 65 | 29,64 | |
| Serveur 2 | 3 | 450 | 9 | 4,104 | |
| Total (kg eCO2) : partagées + serveur = ABC | | | | | |
| | | | | | |
| | 3410,771143 | | | | |

FIGURE 8.7 – Tableau de la méthode ABC pour le data center

Conclusion

Durant ce mémoire, le but était de proposer une méthodologie afin d'évaluer les émissions de CO₂ d'un service applicatif d'une entreprise hébergé dans un data center.

Pour atteindre cet objectif, nous avons réalisé un état de l'art sur les sujets abordés par cette problématique : les data centers, la virtualisation, l'architecture d'entreprise, les standards de mesure de CO₂ et la méthode «Activity based costing». Dans la deuxième partie de ce mémoire, nous avons proposé une méthodologie se basant sur des standards de mesure de CO₂ déjà existant mais en ajoutant une méthode (l'activity based costing) empruntée à l'économie afin d'avoir une analyse plus détaillée des activités provoquant les émissions. Ensuite, nous avons réalisé un prototype assez basique, pour le moment, grâce au logiciel excel et nous avons terminé par réaliser une étude de cas fictive afin de concrétiser cette méthode et ce prototype.

Nous pouvons dire que cette méthode et ce prototype peuvent être une aide précieuse pour des data centers ayant une connaissance moins détaillée (émissions de CO₂) de leur équipement car en plus de donner les chiffres d'émissions concernant la problématique, ils donnent des chiffres génériques proches de la réalité concernant les émissions de CO₂ des différents équipements présents dans les enceintes d'un data center. Grâce aux chiffres d'émissions résultant de l'activity based costing, les data centers pourront les analyser pour ensuite essayer de comprendre les différents postes «gros producteurs de CO₂». Pour les data centers ayant une connaissance beaucoup plus détaillée, ils peuvent suivre la méthodologie et appliquer leurs propres chiffres.

En vue d'améliorer ce mémoire, quelques pistes d'améliorations peuvent être suivies. Dans un premier temps, il serait peut-être opportun de collaborer avec un membre de la Faculté de Sciences Economiques et de Gestion afin d'avoir un avis expert concernant l'intégration de l'activity based costing dans ce travail. Ensuite, concernant le prototype, qui ici est encore très basique, il faudrait peut-être penser à développer un petit logiciel ou une application web permettant d'une part d'utiliser le prototype en utilisant des données génériques et d'autre part en utilisant des données propres à l'entreprise si celle-ci les a. Enfin, l'étude de cas dans ce mémoire était fictive et les chiffres concernant celle-ci ne sont pas des plus précises. C'est pourquoi, une étude de cas sur un data center existant serait une bonne technique afin de valider la méthodologie développée. Au début, nous devions réaliser la méthodologie sur le data center de l'Université de Namur, mais par manque de temps, nous n'avons pas pu le faire.

Troisième partie

Annexe

Appendices

Annexe A

Facteurs d'émissions et données génériques

A.1 Facteurs d'émissions et données génériques

Le guide de ADEME [Ademe et Cigref , 2012] donne des données génériques en rapport avec les émissions de CO₂ d'un data center. Ces données sont des approximations et doivent être adaptées à chaque data center. En effet, ceux-ci ne sont pas construits de la même manière et n'utilisent pas les mêmes équipements IT.

Les données des facteurs d'émissions sont issues de rapports de sociétés de services informatiques et d'analyse de cycle de vie produit des constructeurs. Ces données vont permettre à un entreprise d'évaluer l'impact GES de ses centres de données grâce à des données génériques, si les données primaires ne sont pas disponibles.

Il faut noter que le niveau d'incertitude des facteurs d'émissions lié aux équipements atteint 100% lorsque le nombre de sources d'information est inférieur à trois. Lorsqu'il y a trois sources ou plus, c'est la moyenne des valeurs comme facteur d'émission.

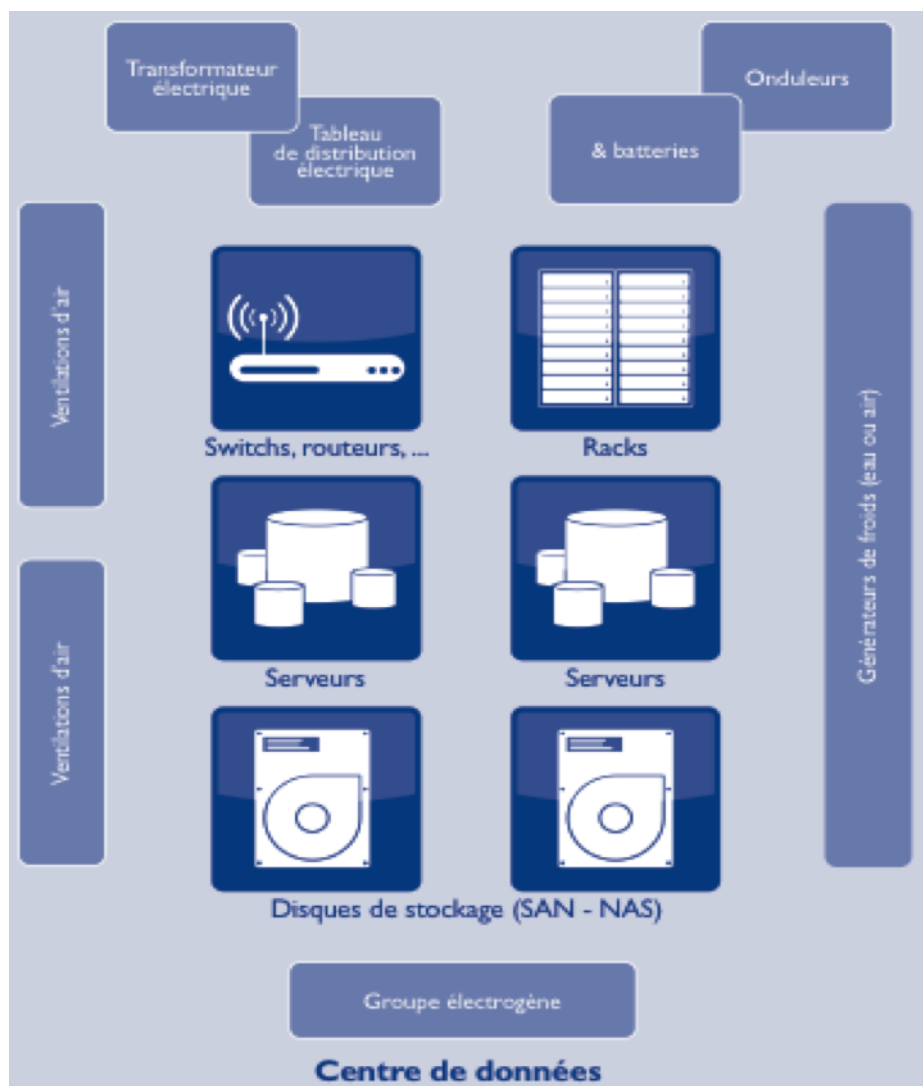


FIGURE A.1 – Les différents facteurs d'émissions dans un data center

A.1.1 Données des équipements IT

| Nature de l'équipement | Données génériques | Durée de vie |
|------------------------|--|------------------|
| Baies de disques | <p>Les systèmes de stockage pourront être valorisés à partir du nombre de disques sur la base d'une valeur de 15,5kg eCO₂.</p> <p>Source : Bilan Produit 2008 Ecoinvent : valeur d'un disque de référence :</p> <ul style="list-style-type: none"> — 12,2 kg eCO₂ par unité — 23 kg eCO₂ par kg de disque — 12 kg eCO₂ + « 30% d'enveloppe » : 15,5kg eCO₂ <p>Cette valeur reprend la donnée générique EcoInvent (Bilan Produit 2008 ADEME) et ajoute une quote-part correspondant à l'intégration dans un châssis.</p> <p>Incertitude : 40%</p> | 7 ans en moyenne |
| Serveurs informatiques | <p>Poids en kg par U : 7 à 16 kg. 400 à 800 kg eCO₂ Source : Les serveurs informatiques ont été évalués selon plusieurs approches :</p> <ul style="list-style-type: none"> — Des ACV constructeurs (hors consommation et fin de vie) donnent des estimations : ACV constructeur Fujitsu (PRI- MERGY TX 300 S5) : 558 kg eCO₂ — Des évaluations modulaires sur la base de données EcoInvent donnent des valeurs approchantes : <ul style="list-style-type: none"> — Rapport Bilan Carbone d'Aubervilliers O2France pour ATOS (données EcoInvent) : 23 kg eq C/kg d'équipement, soit 85 kg eCO₂/ kg d'équipement — Evaluation modulaire Zen'to (EcoInvent/Bilan Produit 2008) : 50 à 100 kg eCO₂ par kg d'équipement <p>Incertitude : 50%</p> | 5 ans en moyenne |

| | | |
|-----------------------------|---|------------------|
| Switch / Routeur / Firewall | 80 kg eCO ₂ / kg d'équipement Source : la notion de Switch / Routeur / Firewall a été évaluée à partir d'une étude modulaire sur la base de données EcoInvent : Rapport Bilan Carbone d'Aubervilliers O2France pour ATOS (données EcoInvent). Cette précédente donnée est convergente avec des données en provenance d'ACV produit par exemple la Livebox d'Orange - France Telecom qui publie 90kg eCO ₂ (phase d'usage inclus). Incertitude : 30% | 7 ans en moyenne |
|-----------------------------|---|------------------|

A.1.2 Données des équipements non IT

| Nature de l'équipement | Données génériques | Durée de vie |
|--|---|--------------|
| Climatisation directe et indirecte (eau-air) | 13 kg eCO ₂ par kg d'appareil, soit 8 à 10 kg eCO ₂ en fonction des équipements Source : Etude EUP room air - http://ecoaircon.eu Incertitude : 60% | 10 à 15 ans |
| Générateur froid air et eau | 13 kg eCO ₂ par kg d'appareil, soit 30 à 70 kg eCO ₂ en fonction des équipements Source : Etude EUP room air - http://ecoaircon.eu Incertitude : 60% | 10 à 15 ans |
| Groupe électrogène | 1,8 kg eCO ₂ / kg d'appareil, soit 20 à 50 tonnes de eCO ₂ en fonction des appareils Source : Evaluations faites à partir d'études modulaires sur la base de données EcoInvent. Incertitude : 60% | 10 à 15 ans |
| Racks | 500 kg eCO ₂ Source : L'évaluation a été faite en croisant : <ul style="list-style-type: none"> — Une ACV constructeurs Environmental Product Declaration (EPD) Minikels Cold Corridor : 475 kg eCO₂ — Une analyse modulaire effectuée par un bureau d'études en valorisant le matériau principal (Acier) via EcoInvent : 550 kg eCO₂ Incertitude : 30% | 10 à 15 ans |

| | | |
|----------------------|---|--------|
| Tableau électrique | 680 kg eCO ₂ Deux sources : <ul style="list-style-type: none"> — Profil environnemental de Produit « Prisma Plus EPD » Schneider Electric donnée constructeur ; — Guide des facteurs d'émissions V6 de l'ADEME (Valorisation CO₂ des matériaux utilisés dans la phase de fabrication). Incertitude : 50% | 20 ans |
| Ventilation aérienne | 5 kg eCO ₂ / kg d'appareil Source : Rapport Bilan Carbone d'Aubervilliers O2France pour ATOS (données EcoInvent) Incertitude : 40% | 10 ans |

A.1.3 Ordinateurs, écrans

| Nature de l'équipement | Facteurs d'émissions |
|------------------------|-------------------------|
| LCD | 336 kg eCO ₂ |
| Desktop (standard) | 305 kg eCO ₂ |
| All-in-one | 501 kg eCO ₂ |
| Laptop | 203 kg eCO ₂ |

Bibliographie

- [ABB, 2011] ABB (2011). L'impact énergétique des data centers. <http://www.abb.fr/cawp/seitp202/1e9c597bdb2d4513c1257956003309f0.aspx>. (Data de consultation 15/11/2014).
- [Acropolis,] Acropolis. Data centers. <http://www.acropolistelecom.net/datacenter>. (Data de consultation 15/11/2014).
- [Ademe et Cigref, 2012] Ademe et Cigref, (2012). Réalisation d'un bilan des émissions de gaz à effet de serre. <http://bilans-ges.ademe.fr/node/76>.
- [Allaire,] Allaire J. Archimate et l'architecture d'entreprise. http://montreal.iiba.org/download/20090617_jallaire_archimate.pdf.
- [Archimate,] Archimate The Open Group, Why archimate. http://www.archimate.nl/en/about_archimate/. (Data de consultation 19/10/2014).
- [Badetz, 2013] Badetz S., Arnaud E., (2013). Architecture d'entreprise : 1ère partie - l'architecture d'entreprise : pourquoi, comment, pour qui ? <http://www.solucom.fr/wp-content/uploads/2013/08/Focus-Solucom-Architecture-dentreprise-1{è}re-partie-WEB.pdf>. (Data de consultation 19/10/2014).
- [Baule, 2009] Baule L., (2009). La virtualisation. <http://home.nordnet.fr/~ericleleu/cours/nfe107/Virtualisation.pdf>.
- [Bendaoud,] Bendaoud H. B., La comptabilité par activité (méthode abc). <http://www.creg.ac-versailles.fr/IMG/pdf/comptabilite-par-activite-abc.pdf>.
- [BiZZdesign,] BiZZdesign. Les façons de modéliser. <http://www.bizzdesign.fr/home/architecture-d-entreprise/exemple-application-architecture-entreprise/les-facons-de-modeliser/>. (Data de consultation 19/10/2014).
- [Bonnet, 2008] Bonnet L., (2008). *État de l'art des solutions libres de virtualisation pour une petite entreprise*. Developpez.com. (Data de consultation 15/05/2015).
- [Bonnet, 2002] Bonnet R., (2002). Virtualisation de stockage : fédérer les volumes en une unique ressource. <http://www.01net.com/editorial/189258/virtualisation-du-stockage-federer-les-volumes-en-une-unique-ressource/>. (Data de consultation 15/05/2015).
- [Brander et al, 2011] Brander M., Sood A., Wylie C., Haughton A., Lovell J., (2011). Technical Paper : electricity-specific emission factor for grid electricity <http://ecometrica.com/assets/Electricity-specific-emission-factors-for-grid-electricity.pdf>

- [Brodhag, 2012] Brodhag C., (2012). Les entreprises cotées à la bourse de londres devront déclarer leurs niveaux d'émissions de gaz à effet de serre dans leurs rapports annuels. <http://www.mediaterre.org/rio2012/actu,20120628184529,3.html>. (Data de consultation 29/10/2014).
- [Caisse des dépôts, 2014] Caisse des dépôts, (2014). Recourir à l'offre existante ou développer un datacenter local. http://www.valoffre.caissedesdepots.fr/IMG/pdf/Guide_Pratique_Data_Centers_Publics_Locaux-janv2014-BAT-v2_br.pdf. (Data de consultation 05/10/2014).
- [Carbone4, 2013] Carbone4, (2013). Royaume-uni : la réglementation sur le reporting CO2 avance. http://www.carbone4.com/fr/l_actu_de_carbone_4/royaume-uni-la-r%C3%A9glementation-sur-le-reporting-co2-avance. (Data de consultation 28/10/2014).
- [Carbon Trust, 2012] CarbonTrust, (2012). Carbon footprinting. http://www.carbontrust.com/media/44869/j7912_ctv043_carbon_footprinting_aw_interactive.pdf.
- [Cattier et al, 2010] Cattier P-F., Combes M., Perrochat J., du Besset G., Orifici S., Palengat J., Latreche A., Zerbib N., Durand R., Grosbost M., Philippe L., Le Calvé A., Rouyer A., Biscarat P., Galindo D., Stern E., Roche D., Manceau X., Sinapi S., Brion S., (2010). *Datacenters : Une chance pour la France*. Livre blanc.
- [Chaffaux, 2011] Chaffaux R., (2011). Quelques bonnes pratiques pour un projet de virtualisation des serveurs. <http://www.nelite.com/community/b/rchaffaux/archive/2011/07/22/quelques-bonnes-pratiques-pour-un-projet-de-virtualisation-des-serveurs.aspx>. (Data de consultation 10/10/2014).
- [Cisco, 2007] Cisco, (2007). Data center 3.0 : la vision cisco pour la nouvelle génération des centres informatique. http://www.cisco.com/web/FR/documents/pdfs/newsletter/ciscomag/2007/09/dossier_data_center_3.0.pdf. (Data de consultation 05/10/2014).
- [Commission Européenne, 2014] Commission Européenne, (2014). 2030 framework for climate and energy policies. http://ec.europa.eu/clima/policies/2030/index_en.htm.
- [Culture Informatique, 2013] Culture Informatique, (2013). C'est quoi la virtualisation. <http://www.culture-informatique.net/cest-quoi-la-virtualisation/>. (Data de consultation 09/10/2014).
- [Debergues, 2009] Debergues J., (2009). Green datacenter : Vers des centres de données durables. <http://www.solucom.fr/wp-content/uploads/2013/07/Focus-Solucom-Green-datacenter.pdf>. (Data de consultation 05/10/2014).
- [Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2009] Department for Environment, Food and Rural Affairs, (2009). *Guidance on how to measure and report your greenhouse gas emissions*. (Data de consultation 20/11/2015).
- [Desfray, 2014] Desfray P., Raymond G., (2014). *TOGAF en pratique - 2e éd. : Modèles d'architecture d'entreprise*. Dunod.
- [Edinburgh Centre for Carbon Management Ltd., 2006] Edinburgh Centre for Carbon Management Ltd., (2006). Forestry commission scotland greenhouse gas emissions comparison carbon benefits of timber in construction. (Data de consultation 04/10/2014).

- [GHG Protocol, 2012a] GHG Protocol, (2012). GreenHouse Gas Protocol. <http://www.ghgprotocol.org>. (Data de consultation 26/10/2014).
- [GHG Protocol, 2012b] GHG Protocol, (2012). Chapter 8 : Guide for assessing ghg emissions of data centers. http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/Chapter_8_GHGP-ICT%20Data%20Center%20guide%20v2-3%2010MAR2012.pdf. (Data de consultation 26/10/2014).
- [GHG Protocol, 2013] GHG Protocol, (2013). Chapter 7 : Guide for assessing ghg emissions related to software. <http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/GHGP-ICT-Software-v2-9-26JAN2013.pdf>. (Data de consultation 26/10/2014).
- [GHG Protocol, 2015] GHG Protocol, (2015). Chapter 1 : Introduction and general principles. <http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/GHGP-ICT-Introduction-Chapter-v1-3-26-JAN-2013.pdf>. (Data de consultation 26/10/2014).
- [Guérineau,] Guérineau H., La virtualisation de serveurs. <http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2008/virtualisation/techniques.html#isolation>. (Data de consultation 09/10/2014).
- [Huart, 2012] Huart M., (2012). Energie et environnement - envi f449. http://mecapp42.ulb.ac.be/atm/foldercours/ENVIF449_Folder/DocENVIF449/Examen201301Data. (Data de consultation 05/11/2014).
- [ISO, 2006] ISO, (2006). ISO 14064-1 :2006. http://www.iso.org/iso/fr/catalogue_detail?csnumber=38381 (Data de consultation 27/10/2014).
- [ISO, 2013] ISO, (2013). ISO/TR 14069 :2013. http://www.iso.org/iso/fr/catalogue_detail.htm?csnumber=43280%20 (Data de consultation 27/10/2014).
- [ITU-T, 2012] ITU-T, (2012). Methodology for energy consumption and greenhouse gas emissions impact assessment of information and communication technologies in organizations. <https://www.itu.int/rec/T-REC-L.1420-201202-I/en>.
- [Jacquot, 2007] Jacquot T., Milkoff R., (2007). *Comptabilité de gestion : analyse et maîtrise des coûts*. Dateios et Pearson Education France.
- [Kaplan, 2008] Kaplan R. S., Anderson S. R., (2008). *TDABC : La méthode ABC pilotée par le temps*. Groupe Eyrolles.
- [Legifrance, 2010] Legifrance, (2010). Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement. http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexteArticle.do?jsessionid=12D3723DE30CBD45E7DFB3F86379D5DE.tpdjo02v_3?idArticle=JORFARTI000022470999&cidTexte=JORFTEXT000022470434&dateTexte=29990101&categorieLien=id.
- [Legifrance, 2014] Legifrance., (2014). Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement. <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000022470434>.
- [Marshal, 2011] Marshal D., (2011). Top 10 benefits of server virtualization. <http://www.infoworld.com/article/2621446/server-virtualization/top-10-benefits-of-server-virtualization.html>. (Data de consultation 09/10/2014).

- [Mestrallet, 2009] Mestrallet M., (2009). Virtualisation : Concepts et techniques de la virtualisation. http://www.resoo.org/pascal/01/Module%20INF_180-IT-Virtualisation-Support%20de%20cours%20Michel%20MESTRALLET-130409.pdf. (Data de consultation 09/10/2014).
- [Nzaou, 2009] Nzaou Nzaou H. K., (2009). *La mise en place d'une gestion par activités : la méthode ABC / ABM*. PhD thesis, Institut supérieur de génie appliqué Casablanca.
- [Pillou, 2015] Pillou J-F., (2015). Infogérance (OutSourcing) - Externalisation. <http://www.commentcamarche.net/contents/323-infogerance-outsourcing-externalisation>. (Data de consultation 14/05/2015).
- [PrimeEnergyIT, 2011] PrimeEnergyIT, (2011). Module 1 introduction et présentation des impacts environnementaux de la consommation énergétique des datacentres et installations informatiques. <http://www.efficient-datacenter.eu/index.php?id=164>. (Data de consultation 06/10/2014).
- [Région wallonne, 2013] Région Wallonne, (2013). Les accords de branche, au carrefour entre réalité économique et politique énergie climat. <http://energie.wallonie.be/fr/les-accords-2014-2020.html?IDC=7863>. (Data de consultation 28/10/2014).
- [Richard,] Richard T., Green datacenter : Un terme galvaudé et pourtant une nécessité. http://media.frnog.org/FRnOG_13/FRnOG_13-1.pdf. (Data de consultation 05/10/2014).
- [Ross, 2006] Ross J. W., Weill P., Robertson D. C., (2006). *Enterprise Architecture as Strategy*. Harvard business school press.
- [Rousse, 2010] Rousse M., (2010) Green data center. <http://searchdatacenter.techtarget.com/definition/green-data-center>. (Data de consultation 14/05/2015).
- [Santos, 2013] Santos M. M., (2013). Conception et mise en place d'une comptabilité analytique par la méthode abc : Cas de la société industrielle moderne des plastiques africains (simpa) du Sénégal. Master's thesis, Centre Africain d'études Supérieures en Gestion.
- [Santy, 2010] Santy F., (2009-2010). La virtualisation. <http://student.ulb.ac.be/~fsanty/cours/ba3/rechcom/virtualisation.pdf>.
- [Systancia,] Systancia. Les principes de la virtualisation. <http://www.systancia.com/fr/les-principes-de-la-virtualisation>. (Data de consultation 14/10/2014).
- [Tetreau, 2013] Tetreau E., (2013). Les enjeux des datacenters aujourd'hui et demain. http://www-05.ibm.com/fr/events/JT_janv_2011/Datacenter_JT2011.pdf. (Data de consultation 05/10/2014).
- [The Green Grid, 2012] The Green Grid, (2012). Harmonizing global metrics for data center energy efficiency. <http://www.thegreengrid.org/~media/WhitePapers/Harmonizing%20Global%20Metrics%20for%20Data%20Center%20Energy%20Efficiency%202012-10-02.pdf?lang=en>. (Data de consultation 05/10/2014).
- [The Open Group, 2013] The Open Group, (2013). Archimate 2.1 Specification. The Open Group. United Kingdom.
- [UK Government, 2013] UK Government, (2013). Measuring and reporting environmental impacts : guidance for businesses. <https://www.gov.uk/measuring-and-reporting-environmental-impacts-guidance-for-businesses>. (Data de consultation 17/05/2015).

- [Uptime Institute,] Uptime Institute, The tier classification system. http://uptimeinstitute.com/images/stories/press_kits/UIPS_TiersSummary_1000511.pdf. (Data de consultation 06/10/2014).
- [VMware,] VMware. Virtualisation. <http://www.vmware.com/fr/virtualization>. (Data de consultation 13/10/2014).
- [Wikipedia, 2004] Wikipedia (2004). Methodology. <http://en.wikipedia.org/wiki/Methodology>. (Data de consultation 23/05/2015).
- [Wikipédia, 2005a] Wikipédia, (2005). Virtualisation. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Virtualisation>. (Data de consultation 15/05/2015).
- [Wikipedia, 2005b] Wikipedia (2005). Energie grise. http://fr.wikipedia.org/wiki/Energie_grise. (Data de consultation 13/05/2015).
- [Wikipédia, 2005c] Wikipédia, (2005). Chaîne de valeur. http://fr.wikipedia.org/wiki/Chaîne_de_valeur. (Data de consultation 22/05/2015).
- [Wikipédia, 2005d] Wikipédia, (2005). Centre de données. http://fr.wikipedia.org/wiki/Centre_de_données. (Data de consultation 13/05/2015).
- [Wikipedia, 2006] Wikipedia (2006). Bilan Carbone. http://fr.wikipedia.org/wiki/Bilan_carbone. (Data de consultation 17/05/2015).
- [Wikipédia, 2013a] Wikipédia, (2013). Sécurité des hyperviseurs. http://fr.wikipedia.org/wiki/Sécurité_des_hyperviseurs. (Data de consultation 15/05/2015).
- [Wikipédia, 2013b] Wikipédia, (2013). Uptime institute. http://fr.wikipedia.org/wiki/Uptime_Institute. (Data de consultation 13/05/2015).